

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

David Džimbeg

**ANALIZA METODA DODJELE KAPACITETA U
VIŠEUSLUŽNIM MREŽAMA I UTJECAJ NA
KVALITETU USLUGE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA METODA DODJELE KAPACITETA U
VIŠEUSLUŽNIM MREŽAMA I UTJECAJ NA
KVALITETU USLUGE**

**ANALYSIS OF CAPACITY ALLOCATION
SCHEMES IN MULTISERVICE NETWORKS
AND THEIR IMPACT ON QUALITY OF
SERVICE**

Mentor: dr. sc. Marko Matulin
Student: David Džimbeg, 0135218222

Zagreb, rujan 2015.

Sažetak

U ovome radu provedena je analiza vremena čekanja paketa u čvoru višeuslužne mreže u ovisnosti o prosječnoj duljini paketa i njihovom broju, kapacitetu odlaznog kanala te primijenjenoj discipline dodjele kapaciteta. Za potrebe ove analize napravljena je simulacija rada čvora višeuslužne mreže za slučajeve ako su u njemu implementirane tri različite strategije dodjele kapaciteta: *First Come First Served* (FCFS), *Priority Queuing* (PQ) i *Round Robin* (RR). Temeljem proračuna vremena trajanja i vremena završetka posluživanja svakog pristiglog paketa, koji su najprije svrstani u četiri klase prometa, izračunato je vrijeme čekanja svakog paketa kao i prosječne vrijednosti i standardna odstupanja. Nakon ovih analiza uspoređene su performanse čvora ukoliko se primjenjuju različite strategije dodjele kapaciteta.

Ključne riječi: višeuslužna mreža; mrežni čvor; performanse mreže; kvaliteta usluge; First Come First served (FCFS); Priority Queuing (PQ); Round Robin (RR).

Summary

In this thesis an analysis of package waiting times in the multi-service network node has been conducted, depending on the average package length and their number, capacity of the outgoing link and the applied discipline for the capacity allocation. For the purpose of this analysis a simulation of multi-service network node has been performed. The performances of the node were analyzed in cases when three different capacity allocation strategies were implemented: First Come First Served (FCFS), Priority Queuing (PQ) and Round Robin (RR). After deriving service time of each package (which were first classified into four traffic classes) as well as their exit times, the waiting time of each packet has been calculated. Furthermore, the average waiting time values and standard deviations are also calculated. After this analysis, performances of the node were compared between different capacity allocation strategies.

Keywords: multi-service networks; network node; network performance; quality of service; First Come First Served (FCFS); Priority Queuing (PQ); Round Robin (RR).

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VIŠEUSLUŽNE MREŽE I PODRŽANE USLUGE.....	3
2.1. Pojemno određenje višeuslužne mreže.....	3
2.2. Protokoli u višeuslužnim mrežama.....	4
2.2.1. Session Initiation Protocol (SIP)	4
2.2.2. RTCP protokol	6
2.2.3. QoS signalizacijski protokoli	6
3. ULOGA MREŽNOG ČVORA U PROCESU PRIJENOSA PODATAKA	9
3.1. Mrežni čvor.....	9
3.2. Vrste čvorova računalne mreže	11
3.3. Funkcije mrežnog čvora u prijenosu podataka	12
3.3.1. Funkcija komutacije mrežnog čvora	12
3.3.2. Funkcije usmjeravanja mrežnog čvora.....	14
4. KVALITETA USLUGE I PARAMETRI MREŽNIH PERFORMANSI.....	17
4.1. Razina usluge.....	17
4.2. Parametri kvalitete	18
4.3. Značajke kvalitete usluge	19
4.3.1. Aplikacijski QoS	20
4.3.2. Mrežni QoS	21
4.4. Isporuka kvalitete usluge	22
4.5. Čekanje paketa u redu i njegov utjecaj na kvalitetu usluge.....	22
5. METODE DODJELE KAPACITETA I NJIHOVE ZNAČAJKE.....	24
5.1. Metoda prioriteta prema vremenskom redoslijedu prijave (First come – first served – FCFS)	25
5.2. Priority Queuing (PQ)	28
5.3. Kružno posluživanje (Round Robin – RR).....	29
6. ANALIZA VREMENA ČEKANJA	31
7. USPOREDBA PERFORMANSI RAZLIČITIH METODA DODJELE KAPACITETA.....	36
8. ZAKLJUČAK	44
LITERATURA.....	45
POPIS KRATICA	48
POPIS SLIKA	50
POPIS TABLICA.....	51
POPIS GRAFIKONA	52

1. UVOD

U današnje vrijeme sve više rastu brzine prijenosa podataka u mobilnim i fiksnim višeuslužnim mrežama što uvelike utječe na razvoj aplikacija koje koriste raspoloživ kapacitet mreže. Davatelji usluga ulažu velike napore u privlačenju novih i zadržavanju postojećih korisnika, nudeći korisnicima što bolje usluge. Također, korisnici te usluge sve češće koriste, ne vodeći brigu o tome koliko prometa generiraju pojedine aplikacije. U tom slučaju dolazi do izražaja uloga komutacijskoga čvora u višeuslužnim mrežama koji izravno utječu na performanse mreže. Vrlo važna funkcija mrežnog čvora je dodjeljivanje kapaciteta pojedinim aplikacijama. Važnost odabira odgovarajuće metode dodjele kapaciteta ključna je za ostvarenje korisnikovih očekivanja u pogledu kvalitete usluge.

Svrha ovog istraživanja je provesti analizu performansi čvora višeuslužne mreže ukoliko se primjenjuju tri različite metode dodjele kapaciteta: *First Come First Served* (FCFS), *Priority Queuing* (PQ) i *Round Robin* (RR). Za unaprijed definirane prometne slučajeve (različite vrste prometnih tokova koji generiraju različit broj paketa, različitih duljina) izračunat će se vrijeme čekanja svakog pojedinog paketa. Time će se dobiti uvid u veličine redova čekanja, te u ostvarene performanse mrežnog čvora.

Naslov diplomskog rada je: **Analiza metoda dodjele kapaciteta u višeuslužnim mrežama i utjecaj na kvalitetu usluge**. Rad se sastoji od osam poglavlja:

1. Uvod
2. Višeuslužne mreže i podržane usluge
3. Uloga mrežnog čvora u procesu prijenosa podataka
4. Kvaliteta usluge i parametri mrežnih performansi
5. Metode dodjele kapaciteta i njihove značajke
6. Analiza čekanja
7. Usporedba performansi različitih metoda dodjele kapaciteta
8. Zaključak.

Nakon uvodnog dijela slijedi drugo poglavlje u kojem je objašnjen pojam višeuslužne mreže. Navedene su i objašnjenje prednosti višeuslužnih mreža, te su spomenute usluge potrebne za posluživanje aplikacija krajnjeg korisnika. Također su detaljno objašnjena tri

glavna protokola korištena u višeuslužnim mrežama *Session Initiation Protocol* (SIP), *Real-time Transport Control Protocol* (RTCP) i *Quality of Service* (QoS) signalizacijski protokol.

U trećem poglavlju je objašnjena uloga mrežnog čvora u procesu prijenosa podataka. Detaljno su objašnjena njegova četiri sloja (fizički sloj, Internet sloj, transportni sloj, aplikacijski sloj) te su opisane vrste čvorova računalne mreže. Prikazane su i funkcije komutacije i usmjeravanja koje obavlja.

U četvrtom poglavlju prikazana je kvaliteta usluge i parametri mrežnih performansi. Opisana je važnost i uloga ciljeva razine usluge Grade of Service (GoS). Također su opisani parametri kvalitete i značajke kvalitete, gdje su posebno istaknuti aplikacijski QoS i mrežni QoS.

Peto poglavlje donosi opis metoda dodjele kapaciteta i njihove značajke. Detaljno su opisane tri metode nad kojima je napravljena analiza performansi: *First Come First Served* (FCFS), *Priority Queuing* (PQ) i *Round Robin* (RR).

Šesto poglavlje donosi analizu vremena čekanja paketa u čvoru višeuslužne mreže gdje su prikazani dobiveni rezultati nakon provedene simulacije rada mrežnog čvora.

U sedmom poglavlju napravljena je usporedba performansi različitih metoda dodjele kapaciteta. Napravljene su razne usporedbe na temelju triju korištenih metoda (FCFS, PQ, RR).

Osmo poglavlje je završno poglavlje gdje je izveden zaključak.

2. VIŠEUSLUŽNE MREŽE I PODRŽANE USLUGE

Prijašnje telefonske mreže su građene na način da prenose samo glasovni promet i pružaju vrlo jednostavne telefonske usluge pod kojima se danas podrazumijevaju stare telefonske usluge - *Plained Old Telephone Service* (POTS). Kad su se počele pojavljivati računalne mreže, iako su bile odvojene od telefonske mreže ili su podaci prenošeni između računala postojao je mali udio prometa na telefonsku mrežu, [1].

2.1. Pojmovno određenje višeuslužne mreže

Višeuslužna mreža (MSN – *Multi Service Network*) može se definirati kao mreža dizajnirana tako da prenosi promet više od jedne vrste aplikacije. To je u suprotnosti s klasičnim mrežama ili mrežama predviđenim samo za jednu vrstu usluge, kao što je telefonska mreža koja može, općenito govoreći, prenositi samo jednu aplikaciju. Premda internetski promet može biti prenošen telefonskim sustavima, ti sustavi se ne smatraju višeuslužnom mrežom jer nisu dizajnirani s tim ciljem, [2]. Višeuslužne mreže dizajnirane su tako da osim što imaju mogućnost prijenosa više tipova usluga putem jedne mrežne infrastrukture, posjeduju i ugrađene mehanizme za pružanje zahtijevane razine kvalitete usluge.

Tradicionalne višeuslužne mreže izvedene su tako da se na podatkovnom sloju *Open Systems Interconnection/Reference Model* (OSI RM) koriste asinkroni prijenosni mod - *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) ili *Frame Relay* (FR) prijenosne tehnologije koje omogućuju prijenos govora komutacijom kanala te prijenos podataka. Novije višeuslužne mreže pridodaju Ethernet, IP, virtualnu privatnu mrežu – *Virtual Private Network* (VPN), više-protokolarno prospajanje labela – *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) i drugo.

Prema [3] neke od prednosti višeuslužnih mreža su:

- Poslužitelji sadržaja i aplikacije – smješteni su izvan same mreže, npr. kao poslužitelji na Internetu;
- Sloj usluga i upravljanja – ovdje se inteligencija za sve od upravljanja pozivom do signalizacije nalazi u mreži;
- Prijenosna mreža – optimizirana za prenošenje i komutiranje velike količine podataka;
- Sloj pristupa – različiti pristupni mediji kao što su bakreni vodovi, *Local Multipoint Distribution Service* (LMDS) i mobilni sustavi.

Jedna velika prednost višeuslužnih mreža očituje se u tome da ona omogućava pružanje usluga koje se obrađuju neovisno. Usluge može lako pružati davatelj usluga koji je povezan na rubove javne prijenosne mreže, umjesto da bude sastavni dio te mreže. Sva komunikacija između poslužitelja i prijenosnog sloja se temelji na otvorenim, standardiziranim protokolima, [3].

U današnje vrijeme se zbog porasta podatkovnog prometa povećava i interes za izgradnju višeuslužne mreže. Postalo je prirodno uvoditi tehnologiju komutacije paketa i u postojeće telefonske mreže da bi se smanjili troškovi rada. To naravno treba učiniti uz potpuno izbjegavanje diskontinuiteta u komunikaciji, dakle, bez prekida rada i bez utjecaja na kvalitetu usluga ili prihod, [3].

U višeuslužnim mrežama potrebno je nekoliko različitih usluga za posluživanje aplikacija krajnjeg korisnika. Usluge prijenosa podataka u takvim mrežama grubo se mogu podijeliti na:

- 1) Usluge s prioritetom
- 2) Usluge s osiguranom isporukom
- 3) *Best Effort* usluge.

2.2. Protokoli u višeuslužnim mrežama

Za višeuslužne mreže bitni protokoli mogu se podijeliti kao sljedeći:

- 1) *Session Initiation Protocol* (SIP)
- 2) *Real-time Transport Control Protocol* (RTCP)
- 3) *Quality of Service* (QoS) signalizacijski protokoli

U nastavku će biti detaljnije objašnjeni spomenuti protokoli te njihova važnost za funkcioniranje višeuslužnih mreža.

2.2.1. Session Initiation Protocol (SIP)

Session Initiation Protocol (SIP) predstavlja protokol namijenjen za upravljanje sesijom u višeuslužnim mrežama. Ključni izazov u ovim mrežama predstavlja osiguranje kvalitete usluge (QoS) za krajnje korisnike uz efektivno iskorištenje mrežnih resursa. Cilj ovog protokola je uspostava i održavanje sesije između dva ili više sudionika u komunikaciji. U većini slučajeva, usluge koje zahtijevaju uspostavu sesije zahtijevaju i određeni stupanj

kvalitete (QoS). SIP samostalno ne može odgovoriti na QoS zahtjeve takvih usluga, što i nije njegova svrha, niti može osigurati odgovarajuću razmjenu QoS signalizacijskih informacija u cilju ostvarivanja QoS podrške, [4].

SIP je signalizacijski protokol aplikacijskog sloja koji se koristi za uspostavu, promjenu i raskid sesije s jednim ili više sudionika u mrežama temeljenim na protokolu IP (engl. *Internet Protocol*). Protokol SIP je razvilo i standardiziralo Radno tijelo za razvoj Interneta *Internet Engineering Task Force* (IETF), a prihvatila su ga i ostala značajna standardizacijska tijela, uključujući i organizacijsko tijelo *The 3rd Generation Partnership Project* (3GPP) u standardizacijskom dokumentu TS 23.228 kao glavni protokol za upravljanje višemedijskim uslugama sljedeće generacije. Izbor protokola temeljen je na činjenici da su telekomunikacijske usluge podložne čestim zahtjevima za promjenama u smjeru unapređenja postojećih usluga ili uvođenja novih. Kako bi se udovoljilo tim zahtjevima bez promjene postojeće opreme, koja bi zahtijevala velike investicije pružatelja usluga, izabrano je modularno rješenje na aplikacijskoj razini. S obzirom na intenzivan razvoj u funkcionalnostima pokretnih uređaja i sve većem udjelu pametnih telefona (engl. *smartphones*) na tržištu, dolazi do razvoja odgovarajućih programskih rješenja koja omogućuju signalizaciju korištenjem protokola SIP, [5].

Postoji šest različitih vrsta zahtjeva u trenutnoj verziji SIP-a (verzija 2.0), a to su:

1. INVITE - ova metoda pokazuje da je korisnik pozvan na sudjelovanje u nekoj sesiji. Za razgovor između dvije osobe pozivatelj šalje i podatke o vrsti medija koje može primiti kao sve ostale parametre (npr. mrežno odredište). Uspješan odgovor sadržava u svom zaglavlju poruku o vrsti medija koju primatelj želi primiti.
2. ACK - potvrđuje da je klijent primio završni odgovor na INVITE zahtjev. Može sadržavati zaglavlje sa svim podacima o vezi, a ako ne sadržava onda se koriste podaci iz INVITE zahtjeva. Ova metoda se koristi samo s INVITE zahtjevom.
3. BYE – *user client* koristi BYE za slanje poruke poslužitelju da želi prekinuti komunikaciju.
4. CANCEL - poništava slijedeći zahtjev, ali ne utječe na već izvršene (zahtjev se smatra izvršenim ukoliko je poslužitelj vratio konačni odgovor).
5. OPTIONS - sadrži informacije o mogućnostima poslužitelja, ali ne uspostavlja vezu.
6. REGISTER - prenosi informacije o lokaciji korisnika do SIP poslužitelja, [6].

2.2.2. RTCP protokol

Kod višeuslužnih mreža, RTCP protokol je stvoren s namjerom da podrži veliki broj funkcionalnosti uključujući kontrolu RTP sesija, nadzor kvalitete i sinkronizaciju više RTP tokova medija. Ovaj protokol temelji se na periodičkom prijenosu kontrolnih paketa između svih sudionika sesije, a primarna funkcija mu je osiguranje povratne informacije o kvaliteti prijema vremenski osjetljivih podataka uporabom izvještaja pošiljatelja (*Sender Report*, SR) i izvještaja primatelja (*Receiver Report*, RR). Korištenjem ovih upravljačkih poruka RTCP protokol obavlja prikupljanje i razmjenu statističkih podataka kao što su ukupan broj prenesenih RTP paketa i okteta, ukupan broj izgubljenih RTP paketa, kašnjenje paketa i slično. Na temelju prikupljenih informacija pošiljatelj se može prilagoditi dinamičkim promjenama mreže (npr. korištenjem tehnika adaptivnog kodiranja, povećanjem redundantnosti i formata za nisko propusno kodiranje), a primatelj utvrditi kvar eventualno nastalog zagušenja u mreži. Prijenos detaljnijih informacija i inkorporiranje dodatnih statističkih podataka u RTCP pakete moguće je ostvariti korištenjem proširenog izvještaja (*eXtended Report*, XR) koji osigurava mrežnim operatorima dodatne informacije iz kojih se može zaključiti o mrežnim performansama i zadovoljavanju *Service Level Agreement* (SLA) danog korisnika, [7].

RTCP protokol kod višeuslužnih mreža osigurava povratnu informaciju svim sudionicima sesije koristeći iste mehanizme distribucije koji se koriste za prijenos vremenski osjetljivih podataka, stoga je neophodno omogućiti pravovremen i pouzdan prijenos ovih poruka. Da bi se pošiljatelj prilagodio dinamičkim promjenama mreže, mora se osigurati prijenos RTCP poruka bez kašnjenja i gubitaka. Prihvaćanjem UDP (*User Datagram Protocol*) protokola za prijenos RTP/RTCP paketa javlja se problem upravljanja zagušenjem koje dovodi do potencijalne nestabilnosti mreže. S obzirom na primarnu funkciju RTCP protokola može se zaključiti da je upravljanje zagušenjem odgovornost protokola koji se nalaze ispod RTP/RTCP sloja u mrežnom sloju.

2.2.3. QoS signalizacijski protokoli

Prethodno objašnjena dva protokola u višeuslužnim mrežama ne bi mogla funkcionirati bez QoS signalizacijskih protokola. Aplikacije imaju različite zahtjeve za kvalitetom usluge (QoS). Perceptualni parametri moraju se preslikati uz parametre vezane uz tehnologiju. Korisnik definira zahtijevani QoS pomoću parametara QoS-a te kreira ugovor s mrežnim operatorom (SLA). Što se tiče naplate, moguće je diferencijalno naplaćivanje usluga

ovisno o razini QoS-a te pregovaranje parametara QoS-a između korisnika i mreže prije početka komunikacije. Zahtjevi za QoS-om pri prijenosu podataka su sljedeći:

- postoje razne vrste podatkovnih aplikacija,
- *best effort* – osnovna klasa za sav podatkovni promet (HTTP),
- *bulk data* (FTP, e-mail, backup, sinkronizacija baza),
- transakcijski/interaktivni podatkovni promet (SAP, Oracle),
- potrebna adekvatna jamstva kapaciteta poveznice,
- *mission-critical data*,
- transakcijski podatkovni promet koji zahtijeva uslugu premium.

DiffServ arhitektura predstavlja efikasno i skalabilno rješenje za osiguranje QoS u IP mrežama. U cilju optimiziranja prijenosnih resursa, ova arhitektura se kombinira s MPLS tehnologijom koja omogućuje te funkcionalnosti kao što su rezervacija resursa, tolerancija na pogreške i optimizacija iskorištenosti resursa. Integracija DiffServ i MPLS arhitekture predstavlja povoljno rješenje problema osiguranja QoS za višemedijski promet uz efikasno iskorištenje mrežnih resursa.

Jedan od najvećih izazova ove arhitekture je odabir signalizacijskog protokola, s obzirom da ne postoji generički signalizacijski protokol. Prema [8] standardizirana su tri signalizacijska protokola koja se mogu koristiti u višeuslužnim mrežama:

- *Label Distribution Protocol* (LDP),
- *Constraint-based Routing Label Distribution Protocol* (CR-LDP),
- *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering* (RSVP-TE).

Kako LDP pruža jedino osnovne funkcionalnosti i ne podržava TE mehanizme, ne može se koristiti u *DiffServ-Aware Traffic Engineering* (DS-TE) mrežama. Preostala dva rješenja omogućavaju TE funkcionalnosti kao što su uspostava *Label Switched Path* (LSP), rezervacija propusnog opsega za LSP, te *Fast Rerouting* (LRR) mehanizmi, što predstavlja ključ za ispunjavanje QoS zahtjeva. Za razliku od CR-LDP, RSVP-TE je najčešće korišteni signalizacijski protokol. U praksi se preferira proširivanje postojećih protokola kada god je to moguće, prvenstveno zbog napora koji je potrebno uložiti u dizajn, standardizaciju, razvoj i

otklanjanje pogreški novih protokola. Iz tog razloga je RSVP-TE odabran kao signalizacijski protokol višeuslužnih mreža, dok se odustalo od daljnjeg razvoja CR-LDP protokola, [8].

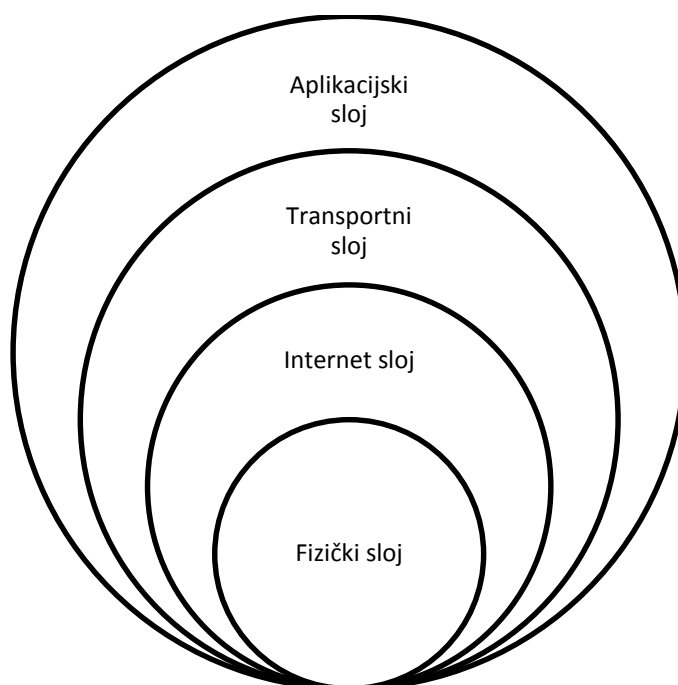
Ovdje opisani protokoli ključni su za pravilan rad višeuslužnih mreža. Osim navedenih protokola bitan element čine, naravno, i mrežna čvorišta koja obavljaju niz važnih funkcija poput usmjeravanja pristiglih paketa određene sesije. Pri tome performanse mrežnog čvora uvelike ovise o metodi dodjeljivanja kapaciteta pojedinim aplikacijama, odnosno metodi dodjeljivanja pristupa mrežnim resursima različitim vrstama prometnih tokova. Uzimajući u obzir raznovrsnost aplikacija i njihovih zahtjeva u vidu mrežnih performansi, važnost odabira odgovarajuće metode dodjele kapaciteta ključna je za ostvarenje korisnikovih očekivanja.

3. ULOGA MREŽNOG ČVORA U PROCESU PRIJENOSA PODATAKA

3.1. Mrežni čvor

Mrežni čvor (kao jedan sustav) podijeljen je na četiri podsustava (sloja) kako to prikazuje slika 1. Time je i Internet mreža postala sustav čija vertikalna arhitektura ima četiri sloja.

Najniže se nalazi fizički sloj ili sloj fizičkog prijenosa podataka, koji se sastoji od hardvera i softvera koji zajedno ostvaruju fizički prijenos sadržaja (nizova bitova, signala) između čvorova. Hardver obuhvaća sve fizičke elemente mreže poput mrežne kartice, čijim radom upravlja softver koji se izvodi na čvoru kojeg ta kartica vezuje na mrežu. Za prijenos podataka potrebni su i nosioci podataka koji povezuju čvorove (to jest, njihove mrežne kartice); nosioci su bakrene žice, optička vlakna i elektromagnetski valovi kod bežične komunikacije, [9].



Slika 1. Prikaz slojeva na kojemu mrežni čvor obavlja funkcije

Internet model ne opisuje detaljno fizički sloj već se ovdje uzima da čvor Internet mreže predaje svoje IP pakete fizičkom sloju ispod sebe i da taj sloj prenosi svaki paket na onaj susjedni čvor na kojeg mu je to zadano (na temelju IP adrese iz zaglavlja tog IP paketa). Procesi fizičkog prijenosa izvode prijenos paketa od čvora do čvora, počevši od izvora pa do konačnog odredišta paketa. Postoje razni sustavi koji pružaju usluge fizičkog prijenosa danih nizova bitova (kao što su IP paketi) na zadanu fizičku adresu čvora, tako da pitanje fizičkog prijenosa ovdje nije problem, a nije ni predmet Internet modela. Sloj fizičkog prijenosa u Internet arhitekturi (modelu) računalne mreže obuhvaća ono što kod OSI modela spada u fizički sloj i u sloj veze podataka, [9].

Drugi sloj – Internet sloj (IP) po svojstvima i funkcijama koje obavlja, odgovara mrežnom sloju u OSI modelu i on se može smatrati središnjim (glavnim) elementom računalne mreže. IP protokol je središnji element Internet mreže, kako na razini modela, tako i na razini njegove realizacije kao računalne mreže. On definira strukturu paketa podataka koji se prenose mrežom, adresni prostor u kojem se paketi kreću, i na način prenošenja (prosljeđivanja) paketa od izvora do odredišta. Internet sloj zadužen je za prosljeđivanje IP paketa od izvora do odredišta i to je ujedno glavni zadatak mrežnog sloja u OSI modelu, tako da se ovaj sloj može nazvati mrežnim slojem u računalnoj mreži Internet.

Treći sloj upravlja prijenosom – transportni sloj, u Internet modelu sadrži dva protokola: TCP (*Transmission Control Protocol*) i UDP. Ti protokoli uspostavljaju komunikaciju između istovrsnih procesa na krajnjim čvorovima (na izvoru i na odredištu) komunikacije, odnosno jednog prijenosnog kanala preko kojeg se ta komunikacija odvija. Na temelju te komunikacije, krajnji čvorovi (izvor i odredište) upravljaju tokom podataka tim kanalom, za potrebe one aplikacije koja je tražila uspostavu toga prijenosnog kanala. TCP protokol ostvaruje pouzdan prijenos sadržaja na način da kod nastanka greške u prijenosu ne potvrđuje primitak onih paketa čiji su sadržaji iskrivljeni ili izgubljeni u procesu prijenosa. Time zahtijeva od istovrsnog entiteta na domaćinu pošiljatelja da pokrene ponovno slanje tih paketa. Kod primjene UDP, prijenos nije pouzdan i on se koristi kod onih prijenosa kod kojih je brzina prijenosa važnija od potpune točnosti; to je obično slučaj kod video sadržaja, pogotovo kod izravnog prijenosa događaja, gdje ispravljanje grešaka obično ne bi imalo smisla jer događaj se odvija dalje. U oba slučaja, sam proces prijenosa IP paketa (na IP i fizičkoj razini) odvija se jednako, ali TCP ispravlja greške koje nastaju na tim razinama, dok UDP to ne čini, [10].

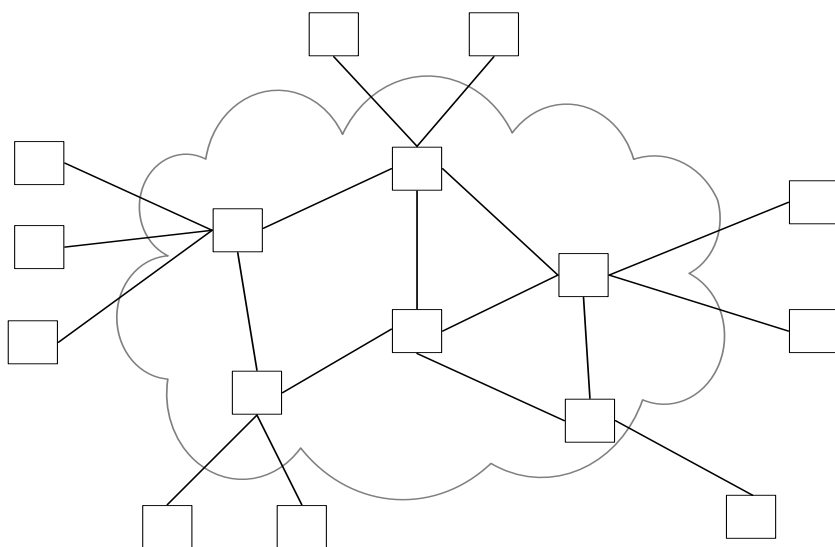
Aplikacijski sloj sastoji se od brojnih softverskih sustava (aplikacija, usluga) koje korisnicima pružaju razne mogućnosti rada s računalnom mrežom. Poznati protokoli aplikacijske razine su SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*), koji definira rad sustava računalne pošte i HTTP (*HyperText Transfer Protocol*), koji definira rad *web* sustava, [10].

3.2. Vrste čvorova računalne mreže

Čvorovi računalne mreže mogu se podijeliti na dvije osnovne vrste:

1. čvorove koji ostvaruju usluge prijenosa,
2. čvorove koji koriste usluge prijenosa.

Čvorovi koji ostvaruju usluge prijenosa tvore "unutrašnjost" mreže i nazivaju se općim nazivom prijenosnici; u tu vrstu čvorova spadaju usmjerivači (*routers*), vrata (*gateways*), preklopnici (*switches*) i mostovi (*bridges*). Različiti nazivi pojedinih prijenosnika odražavaju njihove specifične položaje i uloge u raznim mrežama. Druga vrsta čvorova nalazi se "na rubovima" mreže i nazivaju se „domaćinima“ (*hosts*), jer oni su domaćini za mrežne aplikacije koje rade na tim računalima. Rad aplikacija iziskuje usluge prijenosa podataka, ali aplikacije ne rade na prijenosnicima, niti se nalaze na njima. Slikom 2. prikazana je osnovna struktura računalne mreže s čvorovima u "oblaku" koji su prijenosnici, i čvorovi izvan oblaka – domaćini, [10].



Slika 2. Čvorovi računalne mreže

Izvor: [10]

Domaćine se naziva i završnim računalima, odnosno završnim sustavima (*end systems*). Domaćini (*hosts*) se mogu podijeliti na dva temeljna razreda:

- klijentske sustave (*clients*) i
- poslužiteljske sustave (*servers*).

Serveri se odnose na računala koja su stalno vezana na mrežu i aktivna, dok klijente predstavlja terminalna oprema korisnika (osobna računala, mobilni uređaji i sl.) na kojima oni izvode razne poslove i preko kojih koriste usluge računalne mreže onda kada to žele. Na serverima se nalaze *web* stranice i pretinci računalne pošte korisnika, pa oni omogućuju klijentskim sustavima (i korisnicima) povezivanje na mrežu kada žele i korištenje njene usluge prijenosa raznih vrsta informacijskih sadržaja. Serverska računala su obično veća, ali podjela na klijente i servere ne temelji se na veličini računala, već njihovim ulogama i na poslovima koje obavljaju protokoli (programi) koji se izvode na njima, [11].

Završni sustavi vežu se za rubne usmjerivače, koji se dalje vežu na druge usmjerivače, a oni zajedno ostvaruju prijenosni sustav računalne mreže kao cjeline. Oni usmjerivači na koje se izravno vežu završni sustavi (domaćini), nazivaju se rubnim usmjerivačima (*edge routers*). Na rubne usmjerivače vezana su završna računala koja služe kao domaćini raznim serverima dok završna računala koja imaju ulogu klijenata vežu se na rubne usmjerivače povremeno, kad žele izvoditi neke operacije uz pomoć računalne mreže, [11].

3.3. Funkcije mrežnog čvora u prijenosu podataka

Komunikacijska mreža sačinjena je od sustava na koje se spajaju korisnička komunikacijska oprema, računala i drugi uređaji. Komunikacijski sustavi u čvorovima mreže obavljaju funkcije komutiranja (engl. *switching*) komunikacijskih kanala sa svojih ulaza na svoje izlaze, usmjeravanja (engl. *routing*) informacija prema drugim čvorovima te, po potrebi, obrade i pohrane informacije. Čvorovi su povezani prijenosnim medijima preko kojih se prenosi informacija (engl. *transmission*), a to obavljaju prijenosni ili transmisijski sustavi, [12].

3.3.1. Funkcija komutacije mrežnog čvora

Osnovna je zadaća mreže ostvariti protok informacija između točaka na koje su priključeni korisnici. Prema [11] dva su osnovna načina izmjene informacija:

1. komunikacijskim kanalom ili
2. informacijskim paketom

Upravo radi toga se razlikuju:

1. mreže s komutacijom kanala (engl. *Circuit switched network*) i
2. mreže s komutacijom paketa (engl. *Packet switched network*), [13].

Povezivanje na načelu komutacije kanala i komutacije paketa zahtijeva odgovarajuće upravljačke i kontrolne funkcije kojima se određuje koje je točke potrebno povezati i kako to ostvariti obzirom na ukupan informacijski promet i stanje mreže (opterećenost, smetnje, kvarovi).

Kod mreže s komutacijom kanala osnovna informacijska jedinica je poziv. Prilikom uspostave poziva rezervira se kanal od izvora do odredišta. Primjer takve mreže je klasična telefonska mreža, u kojoj se prilikom uspostave veze rezervira jedan govorni kanal kapaciteta 64 kb/s od korisnika A do korisnika B. Kanal je rezerviran tijekom kompletnog trajanja veze i drugi korisnici se ne mogu koristiti tim kanalom. Dobra strana takvog načina komuniciranja je da se korisnicima može garantirati određena kvaliteta usluge za vrijeme trajanja poziva (konstantno kašnjenje s kraja na kraj, konstantna brzina prijenosa, itd). Negativna strana takvog načina komuniciranja je što je kanal rezerviran i u slučajevima kada se ne koristi. Primjerice ukoliko se korisnik modemom spaja na Internet, uspostavlja se telefonska veza od korisnikovog modema do ISP-a (pružatelja internet usluga) koja je rezervirana za korisnika i ukoliko on ne prenosi nikakve podatke. Osnovni kriterij za vrednovanje mreže s komutacijom kanala je vjerojatnost blokiranja P_B – često se koristi i mjera stupanj posluživanja - *Grade of Service* (GoS), [14].

Kada korisnici u mreži žele komunicirati, mreža mora nekako odrediti put kojim će putovati informacijska jedinica koja prenosi informaciju. Mreža neprestano računa putove između svih parova čvorova. Kod komunikacije se na osnovu izvorišne i odredišne adrese izabire jedan od unaprijed izračunatih putova za informaciju koja se razmjenjuje i komutacija se obavlja po izabranom putu. Izbor puta može biti uvjetovan trenutnim prometnom stanjem u mreži. Proces prikupljanja informacije o topologiji mreže, računanje putova (ruta) u mreži zove se upravljanje usmjeravanjem.

Prva mreža za komutaciju paketa razvijena je 1960. godine u korporaciji RAND u okviru vojnog projekta izrade pouzdanog sustava prijenosa govora. Govor je bio digitaliziran i prenošen u malim paketima digitalnih informacija mrežom. Ova mreža omogućavala je velik broj alternativnih putova između pojedinih čvorova, tako da je i u slučaju uništenja većeg dijela mreže komunikacija bila moguća još sačuvanim vodovima i čvorovima. Svaki paket nosio je osim digitalne informacije i adresu odredišta, čim bi došao u čvor, paket bi bio

prosljeđen prema odredištu bez zadržavanja. To je omogućavalo brzi prijenos informacija kroz mrežu, koja se ponašala kao vrlo brza mreža „Spremi – i – otpremi“. Tako je eksperimentalno dokazana mogućnost korištenja ovakve mreže za prijenos govora, no visoka cijena i neki tehnički problemi su onemogućili njenu komercijalnu primjenu u tom području. Za prijenos podataka pokazao se ovaj tip mreže vrlo pogodan, [15].

Komutacija paketa nalikuje posebnom obliku komutacije poruka, prilagođenom baratanju prometom podataka, no ipak postoje vrlo važne razlike između komutacije poruka i komutacije paketa. Razlika između komutacije poruka i komutacije paketa počinje već kod samih poruka i paketa. Poruke razmjenjuju korisnici mreža. One su jedinice informacije, koje oni prepoznaju, pa su formatirane prema njihovim potrebama. Dužina im je varijabilna i može biti relativno velika. Mreža preuzima poruku i brine se o njejoj isporuci. Na poruku se ne očekuje uvijek odgovor. Vrijeme prijenosa može biti znatno, [15].

Paketi su prilagođeni računalu, pa imaju fiksni format koji nije pogodan za upotrebu od strane čovjeka. Da se postigne kratko vrijeme prijenosa, oni su kratki. Ako prenijeta poruka prelazi veličinu paketa, ona se „reže“ u manje dijelove koji se pakiraju i u pakete i tako se šalje kroz mrežu. Svrha mreže s komutacijom paketa je dostava paketa s minimalnim kašnjenjem. Ove mreže ne zadržavaju pakete. Ako su pozvani terminal, ili računalo zauzeti, dijalog vjerojatno neće ni započeti. No ako dijalog počne, u toku njega će biti razmijenjeno mnogo paketa prije nego što završi. Ako korisnik zahtijeva pohranjivanje poruka koje su stigle paketskim prijenosima on ih ne može trenutno primiti, one se mogu pohraniti, ali izvan mreže, a ne u čvorovima mreže, kao što je slučaj kod komutacije poruka, [15].

3.3.2. Funkcije usmjeravanja mrežnog čvora

Usmjeravanje je proces određivanja putova kojim će se odvijati komunikacija između mrežnih entiteta s poznatim imenima (adresama). Usmjeravanje kao postupak određivanja putova u mreži ne temelji se samo na poznavanju para izvorište-odredište, već putovi mogu ovisiti i o vrsti informacije (u višeslužnim mrežama) koja se prenosi (podaci ili video). Različite vrste mreža se koriste usmjeravanjem na različite načine. Kod nepaketskih mreža se protokol usmjeravanja koristi kako bi se saznao put po kojem će se uspostaviti kanal prilikom uspostave poziva. Kada je poznat put, na svim čvorovima i granama obavlja se rezervacija kanala i započinje komunikacija.

Postoji razlika između fiksnog i alternativnog usmjeravanja što je prikazano tablicom

1.

Tablica 1. Razlika između fiksnog i alternativnog usmjeravanja

Fiksno usmjeravanje	Alternativno usmjeravanje
<ul style="list-style-type: none">- Pozivi se usmjeravaju prema odredištu prema jednoj unaprijed definiranoj ruti za svaki par izvorište odredište	<ul style="list-style-type: none">- Omogućava efikasnije korištenje potencijala mreže preusmjeravanjem poziva na alternativne putove
<ul style="list-style-type: none">- Postavljanje i izbor rute su određeni na osnovu prethodnog plana i zadržavaju se dugi period vremena	<ul style="list-style-type: none">- Može se odvijati prema unaprijed definiranoj vremenskoj shemi ili reagiranjem na temelju stvarnovremenskih mjerenja
<ul style="list-style-type: none">- Zadovoljava u uvjetima normalnog opterećenja mreže	<ul style="list-style-type: none">- Koristi se postižu u ekonomskom smislu i u poboljšanju kvalitete usluge uz iste stvarne kapacitete mreže
<ul style="list-style-type: none">- U uvjetima preopterećenja i kvarova pokazuje velike nedostatke	<ul style="list-style-type: none">- Zahtijeva složeniju tehniku upravljanja
	<ul style="list-style-type: none">- Nedostatak ovakvog usmjeravanja je povećana nestabilnost mreže kod preopterećenja koja se simultano pojavljuju na više grana.

Izvor: [16]

Važan faktor u procesu prijenosa podataka imaju i discipline posluživanja. U ovome radu provedena je analiza različitih disciplina: FCFS, PQ i RR. One odlučuju kojim će se redoslijedom prenositi paketi, tj. koliko će koji paket kasniti što izravno utječe na samu kvalitetu usluge.

Kvaliteta usluge može se promatrati s dva različita stajališta. Kvaliteta usluge iz korisničke perspektive je subjektivan doživljaj svakog korisnika te njegov sud o dobivenoj usluzi. Drugi pogled na kvalitetu usluge je iz perspektive davatelja usluge, odnosno mrežnog operatora i ona se temelji na mjerljivim mrežnim parametrima poput kašnjenja, kolebanja kašnjenja, gubitka paketa i slično. QoS parametri mogu biti dobiveni iz subjektivnih i objektivnih metoda mjerenja. Objektivni QoS parametri dobiveni su mjerenjem fizičkih

osobina mreže, dok se subjektivni QoS parametri dobivaju na temelju ocjena više korisnika za određeni tip usluge.

4. KVALITETA USLUGE I PARAMETRI MREŽNIH PERFORMANSI

U većini slučajeva, usluge koje zahtijevaju uspostavu sesije zahtijevaju i određeni stupanj kvalitete (QoS). SIP samostalno ne može odgovoriti na QoS zahtjeve takvih usluga, što i nije njegova svrha, niti može osigurati odgovarajuću razmjenu QoS signalizacijskih informacija u cilju ostvarivanja QoS podrške. U tu svrhu, definiran je RTCP s primarnim ciljem da osigura povratnu informaciju o kvaliteti dostavljanja vremenski osjetljivih usluga. Iako se temelji na periodičkoj razmjeni kontrolnih paketa između svih sudionika sesije koristeći iste mehanizme distribucije koji se koriste i za prijenos podataka, RTCP ne garantira QoS za vremenski osjetljive usluge. Za ovu funkciju moraju se koristiti protokoli koji se nalaze ispod RTCP-a u TCP/IP protokol sloju, [17].

4.1. Razina usluge

Ciljevi razine usluge (GoS – *Grade of Service*) se definiraju u preporukama E.600 i E.720 koje se koriste da bi se osigurale mjere adekvatnosti (dostatnosti) grupe resursa, pod specificiranim uvjetima. Te varijable GoS-a mogu se izraziti: vjerojatnošću blokiranja, vjerojatnošću čekanja, itd. Prema [18] blokiranje i čekanje uzrokovani su:

- upravljanjem prometnim kapacitetom u mreži ili ograničenim kapacitetom komponenti mreže i
- time što su prometni zahtjevi stohastičke prirode.

GoS se zapravo odnosi na dio mrežnih performansi (NP – *Network Performance*) koje su povezane prometom i definiraju se kao sposobnost mreže ili dijelova mreže da osiguraju funkcije koje se odnose na komunikaciju između korisnika. Mrežne performanse ne prekrivaju samo GoS koji se često naziva i performanse prometne sposobnosti (*trafficability performance*), nego i druge ne-prometne aspekte kao što su pouzdanost, svojstva prijenosa i značajke tarifiranja. Ciljevi mrežnih performansi – NP, a posebno razina usluge – GoS su izvedeni iz zahtjeva kvalitete usluge QoS, [18].

QoS je skup performansi usluge koje određuju stupanj zadovoljstva korisnika uslugom. Parametri QoS-a su korisnički orijentirani i opisani su na način koji nije ovisan o mreži. NP parametri iako su izvedeni iz QoS parametara, su mrežno orijentirani, tj. upotrebljivi su za specifikaciju zahtjeva koji se odnose na performanse pojedinih mreža. Premda parametri u konačnici određuju kvalitetu usluge (QoS) kako je vidi korisnik, nije

potrebno da oni opisuju kvalitetu na način koji je u potpunosti razumljiv korisniku. QoS zahtjevi određuju ciljeve razine usluge od točke do točke. Pojedini dijelovi ciljeva GoS-a odnose se na pojedine dijelove mreže ili mrežnih komponenti za ostvarenje komunikacije od kraja do kraja. Ti dijelovi će ovisiti o strategiji mrežnog operatora. Tako da ITU preporuke specificiraju samo dijelove i pridjeljivanje ciljeva GoS-a različitim mrežama koje možda moraju surađivati pri uspostavi poziva, [18].

Ključni problem koji treba riješiti u određivanju QoS standarda je raspodijeliti pojedine vrijednosti na svaki mrežni element na način da se postigne ciljna vrijednost kvalitete usluge od kraja do kraja (*end-to-end* QoS). U IP mrežama alokacija performansi je obično učinjena po oblacima koji zapravo predstavljaju skup rutera i linkova koji su pod nadležnošću jednog operatora (ili više njih), ili davatelja internetskih usluga (*Internet Service Provider* - ISP). Oblak je povezan s drugim oblakom linkom odnosno *gateway ruter* u jednom oblaku je povezan preko linka s *gateway ruterom* u drugom oblaku. Komunikacija od kraja do kraja između *hostova* odvija se na putu koji je sastavljen od niza domena i linkova između njih. Takav niz predstavlja hipotetički referentni put u svrhe alokacije performansi.

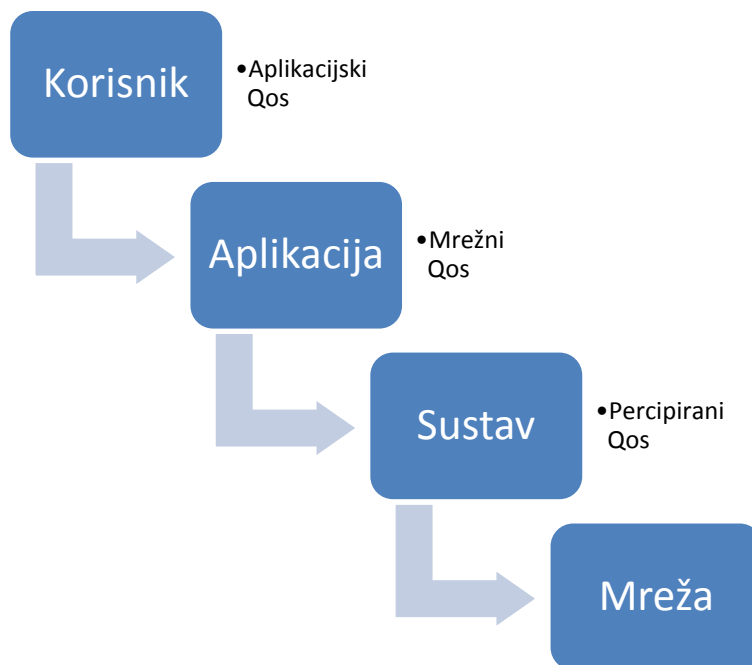
Kvaliteta usluge i pojmovi koji je opisuju (parametri, mjere, upravljački mehanizmi) predstavljaju bitne elemente pružanja bilo koje usluge. Razumijevanje osnovnoga koncepta kvalitete i upravljanja kvalitetom je osnova za profesionalno upravljanje QoS-om u telekomunikacijama. QoS u telekomunikacijama može se razvijati iz osnovnih koncepata kvalitete. Razvojem novih aplikacija koje vode porastu sofisticiranih usluga, sve više postoji potreba za standardizacijom performansi. Uz povećanu kompleksnost u tehnologiji, parametri postaju sve kompliciraniji, [18].

4.2. Parametri kvalitete

U upravljanju kvalitetom upotrebljavaju se izrazi značajke kvalitete usluge (QoS *characteristics*) i parametri kvalitete (QoS *parameters*). Kada se značajke kvalitete definiraju jednoznačno s jasnim granicama, tada se one nazivaju parametrima. Parametri su korisni u izražavanju kvalitete dodjeljivanjem znamenaka koje predstavljaju razinu performansi koje ti parametri pokazuju. Parametri mogu biti izraženi u jednoj ili više mjernih jedinica. Sve značajke kvalitete ne mogu biti definirane kao parametri koji se mogu mjeriti objektivno. Kriterij kvalitete, kao što je primjerice jasnoća govora, izražava se pomoću kvalitativnih parametara rangiranjem subjektivnih performansi. Fleksibilnost koju nudi davatelj usluga mogu korisnici rangirati na rangiranoj skali od 1 do 5, gdje 1 može označavati slabu, a 5

odličnu jasnoću. U tom slučaju pitanje koje je postavljeno korisniku postaje "parametar" i "ocjena mjere" (vrijednost tog parametra na rangiranoj skali), [18].

Preslikavanje parametara kvalitete može se prikazati kao na slici 3.



Slika 3. Preslikavanje parametara kvalitete

Izvor: [18]

Kvalitetu usluge moguće je promatrati i na razini komunikacijskog sustava i na razini korisničkog terminala, aplikacije koja se izvršava i zadovoljstva korisnika. Parametri QoS-a koji se odnose na aplikacije koje se izvršavaju i zadovoljstva korisnika tj. na različite razine promatranja međusobno se razlikuju. Problem preslikavanja (translacije, prevođenja) parametara QoS-a s jedne na drugu razinu vrlo je značajan, a proces je prikazan slikom 3.

4.3. Značajke kvalitete usluge

Značajke kvalitete usluge odnose se na one aspekte kvalitete usluge koji se mogu identificirati i kvantificirati. Njihova definicija iskazuje se neovisno o načinu na koji se kontroliraju, pa se mogu shvatiti i kao varijable u modelu opisivanja telekomunikacijskog sustava. Svrha uvođenja značajki QoS-a je modeliranje stvarnog ponašanja sustava, a ne onog uočenog prilikom mjerenja. Kao primjeri značajki QoS-a mogu se navesti: kašnjenje, varijacije kašnjenja, propusnost, vjerojatnost pogreške, dostupnost, pouzdanost, cjelovitost, itd. Prema [18], te značajke se mogu podijeliti u tri osnovne skupine:

- generičke
- posebne -vezane uz određene usluge
- izvedene.

Upravljanje kvalitetom kao funkcija, odnosi se na sve one funkcije koje su usmjerene k zadovoljavanju zahtjeva za QoS-om koje je istakao neki entitet. Osnovne komponente od kojih su izgrađene te funkcije nazivaju se mehanizmima QoS-a, a skup pravila koja određuju preslikavanje između značajki QoS-a i funkcija upravljanja QoS-om naziva se politikom QoS-a. Entiteti koji primaju zahtjev za QoS-om analiziraju ih i na temelju primijenjene politike pokrećući neke od mehanizama QoS-a. Rezultat rada tih mehanizama može biti: lokalna obrada koja zadovoljava istaknute zahtjeve za kvalitetom usluge, generiranje novih zahtjeva i njihovo prosljeđivanje drugim entitetima ili pokretanje novih mehanizama QoS-a, [18].

Kvaliteta usluge kako je percipira korisnik odnosi se na apstraktne zahtjeve korisnika u pogledu promatrane usluge ili aplikacije. Saznanja o procesu percepcije i dalje nisu potpuna i uglavnom potiču od odgovora koje o subjektivnom doživljaju kvalitete pružaju ispitanici.

4.3.1. Aplikacijski QoS

Aplikacijski sloj najbliži je korisniku, odnosno aplikacijski sloj i korisnik direktno komuniciraju s aplikacijom. On sadrži aplikacijske protokole koji se svakodnevno koriste kao što su HTTP, FTP (*File Transfer Protocol*), SMTP i mnogi drugi, [19].

Aplikacijski sloj pruža usluge i aplikacije krajnjem korisniku. Taj sloj definira usluge i aplikacije za korisnike, što uključuje i odgovarajući sloj protokola. Sadrži aplikacijske računalne procese kojima se aplikacije i usluge ostvaruju. Na aplikacijskom sloju nalaze se rješenja za različite usluge i primjene Interneta, bilo da su orijentirane ka krajnjem korisniku (npr. elektronička pošta) ili ka sustavu (npr. sustav imenovanja domena, DNS), [20].

Između ostalog, aplikacijski QoS odnosi se na zahtjeve u pogledu kvalitete koji se postavljaju pred aplikacije. U okviru aplikacijskog QoS-a specificiraju se svojstva uređaja i mrežnih elemenata koji sudjeluju u procesu komuniciranja. QoS zahtjevi za aplikacije su tipično tzv. zahtjevi od kraja do kraja koje nameću odgovarajuće zahtjeve performansi na mrežu i na krajnje sustave/aplikacije, [20].

4.3.2. Mrežni QoS

QoS parametri specificiraju kvalitetu resursa dodijeljenih usluzi kao i disciplinu posluživanja koja omogućuje najbolju raspodjelu resursa. Stoga je vrlo važno prevesti korisnički/aplikacijski QoS u mrežni QoS. Translacija između korisničkog i aplikacijskog QoS-a nije trivijalna, jer još uvijek nije u potpunosti shvaćeno pitanje percepcije. Aplikacijski QoS koji zapravo specificiraju korisnici potrebno je translirati u mrežni QoS. Što se tiče mrežnog QoS-a, on obuhvaća zahtjeve koji se postavljaju pod mrežnu infrastrukturu. Parametri koji se promatraju u okviru mrežnog QoS-a su: protok, kašnjenje u prijenosu, varijacije kašnjenja, vjerojatnost greške, vjerojatnost gubitka paketa, itd, [18].

Prema [21] tipični QoS parametri na mrežnom sloju su:

- Raspoloživost (*Availability*) – U idealnom slučaju mreža bi trebala biti raspoloživa u 100% radnog vremena, što nije slučaj u realnim uvjetima eksploatacije. Po pitanju raspoloživosti, kvalitetnim se smatraju one mreže, čija je raspoloživost jednaka 99,9999 postotaka promatranog vremena, što odgovara jednom prekidu mjesečno u trajanju od 2,6 sekundi.
- Efektivni kapacitet ili propusna sposobnost (*Throughput*) – Ovaj parametar označava efektivnu brzinu prijenosa podataka u mreži, izraženu brojem prenesenih informacijskih bita u sekundi. Ova brzina je redovno manja od kapaciteta kanala i protoka bitova u mreži, koji se često naziva i propusnim opsegom mreže. U višeslužnim mrežama se definira efektivna propusna sposobnost, odnosno najniža brzina prijenosa informacijskih bita.
- Gubitak paketa (*Packet Loss*) – Nastaje u mreži u slučaju kad dođe do prepunjivanja *buffera* u komutacijskim sustavima i *routerima*, kao posljedica čekanja paketa u redovima za komutaciju, odnosno *routiranje*. Do gubitka paketa može doći i ako se paket usmjeri na pogrešnu destinaciju. U mrežama s dobro riješenim upravljanjem, gubitak paketa prosječno iznosi manje od jednog postotka mjesečno.
- Kašnjenje (*Latency*) – Vrijeme potrebno da se paketska poruka prenese od izvorišta do odredišta se definira kao kašnjenje. Veličina kašnjenja zavisi od niza faktora, kao što su: kašnjenje pri kodiranju/dekodiranju, kompresiji/dekompresiji, kašnjenje pri paketizaciji, kašnjenje pri prijenosu, kašnjenje uzrokovano propagandom signala po

različitim prijenosnim medijima, kašnjenje pri komutaciji, zbog čekanja u bufferima, itd.

- Varijacija kašnjenja (*Jitter*) – Razlika u kašnjenju između susjednih paketa iste sesije. Na pojavu varijacije kašnjenja utječu mnogi faktori, kao što su: varijacija dužine redova paketa u čekanju, varijacija vremena obrade paketa, itd.

4.4. Isporuka kvalitete usluge

Sam proces isporuke kvalitete usluge je proces osiguravanja da doživljena degradacija kvalitete bude unutar utvrđenih granica. Razumijevanje kako svaka interesna skupina (*stakeholders*) gleda na aktivnosti koje se poduzimaju je ključno u stvaranju okosnice koja ukazuje na sve njihove potrebe. U osnovi, za proces upravljanja kvalitetom usluge zainteresirane su dvije interesne skupine: davatelji usluga i korisnici.

Što se tiče korisnikove točke gledišta važni su njihovi "zahtjevi" za kvalitetom i njihova "percepcija" primljenih performansi. S točke gledišta davatelja usluga, važna je "planirana" kvaliteta usluge (nazvana ponuđena) i kvaliteta usluge koja je zapravo "postignuta" ili "isporučena", [22].

Telekomunikacijska mreža egzistira da bi podržala aktivnosti korisnika, a efikasno dizajnirana mreža će udovoljavati korisničkim očekivanjima. Korisnike ne interesira kako mreža funkcionira sve dok im omogućuje izvođenje njihovih aktivnosti. Želje korisnika i njihovo razumijevanje mogu se primjerice izraziti performansama današnjih mreža, koje oni ne vole: dugo očitavanje, web stranice, nepredvidiva brzina skidanja datoteka, loša kvaliteta videokonferencije, dugo vrijeme spajanja na poslužitelj elektroničke pošte, itd. Te negativnosti potrebno je pretvoriti u zahtjeve visoke razine koje bi mreža trebala poštovati. Ono što je važno naglasiti, ako mreža može udovoljiti zahtjevima uz prihvatljive troškove, korisnici bi trebali mrežu vidjeti kao uspješnu. Bilo bi čak i bolje kada bi korisnici bili nesvjesni bilo kojega drugačijeg ponašanja rada mreže, primjerice promjene u brzinama skidanja datoteka, [22].

4.5. Čekanje paketa u redu i njegov utjecaj na kvalitetu usluge

Red je skup objekata koji čekaju na posluživanje. U slučaju kada govorimo o paketnom prijenosu podataka, u redu (ili repu) nalaze se paketi u memoriji *routera* i čekaju na posluživanje, odnosno na usmjeravanje kako bi mogli nastaviti svoj put od izvora do odredišta podataka. Paketi mogu biti posluženi raznim disciplinama posluživanja. Upravljanje redovima

čekanja nastoji ublažiti zagušenje mreže pa ako je potrebno i odbacivanjem paketa. Ako se u prijenosu pojave paketi koji su uslijed kašnjenja poslali neupotrebljivi npr. prijenos slike i zvuka tada i takvi paketi bivaju odbačeni kako bi oslobodili kapacitete jer će ih primatelj podataka ionako odbaciti. Algoritam raspoređivanja ili planiranja određuje koji paket će biti sljedeći poslan kako bi održao i poštovao prioritete raspoređivanja raspoloživih kapaciteta. Upravljanje redovima čekanja također je dio QoS-a u kojima se protok podataka identificira i klasificira i tada se smješta u red čekanja radi osiguravanja odgovarajućeg nivoa usluge prijenosa podataka.

5. METODE DODJELE KAPACITETA I NJIHOVE ZNAČAJKE

Kanal određenog kapaciteta izraženog u bit/s dodjeljuje se na zahtjev (npr. pozivanjem) ili trajno – iznajmljivanjem. Kanalski način rada posebno je prikladan za kontinuirani protok informacija u stvarnom vremenu, npr. kod razgovora kada je važno održati vremenske parametre komuniciranja kako se ne bi ugrozila razumljivost zbog prevelikih kašnjenja ili promjene kašnjenja. Nedostatak komutacije kanala je neučinkovitost s motrišta mreže, jer se dodijeljeni kapacitet zauzima (i naplaćuje) neovisno o tome koliko se informacije prenosi. Telefonska mreža je primjer mreže s komutacijom kanala, [23].

Kapaciteti prijenosa u telekomunikacijskim mrežama kontinuirano rastu. Za povezivanje glavnih mrežnih točaka, uz znatno veće prijenosne kapacitete, u gotovo svim slučajevima primjenjuje se optički kabel. Međutim, pristupna mreža implementiranjem novih usluga, zbog svoje male propusnosti, u sve većoj mjeri postaje "usko grlo".

U arhitekturi mreže u kojoj više korisnika treba pristup do istog komunikacijskog sustava potrebno je definirati tehnologiju pristupa kojom bi se svakoj pristupnoj točki omogućilo korištenje njenoga vlastitoga komunikacijskoga kanala.

Postoji nekoliko parametara na osnovi kojih se može izabrati najbolje rješenje: spektralna efikasnost, potrebna snaga zračenja, složenost izrade koja je povezana s isplativošću te maksimalne brzine prijenosa podataka.

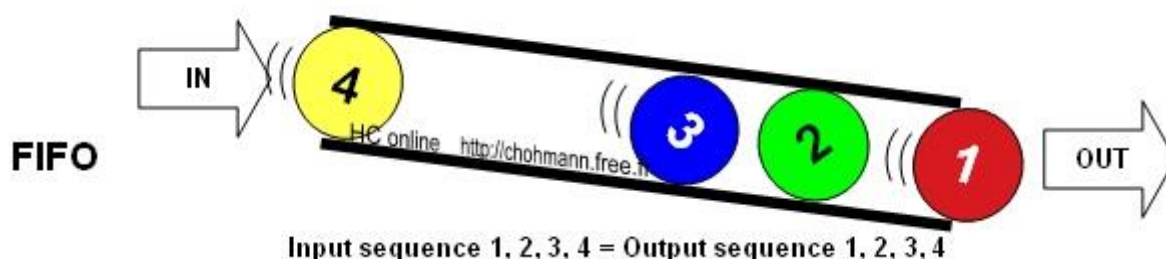
Različiti autori predlažu različite metode za dodjelu kapaciteta. Gavish i Neuman predlažu metodu Lagrangovog opuštanja za dodjelu kapaciteta mreža i dodjelu prometa u paketima zamjene mreža, ali njihov model pretpostavlja da je promet preusmjeren kroz jedan put. Medhi i Tipper su usporedili četiri različita pristupa problemu dodjele kapaciteta koji opisuje više probleme dimenzioniranja „*multi-hour*“ mreže za ATM umrežavanja, ali se njihove studije temelje na pretpostavci prometa koji prolazi jednim putem, [24].

Zajednička i važna metoda razlikovanja između različitih tipova LAN-a je uzimanje u obzir njihovih pristupa mediju. S obzirom da mora postojati metoda koja određuje koji čvor može poslati poruku, ovo je kritično područje koje određuje učinkovitost LAN-a. Postoje razne metode koje se mogu uzeti u obzir, a u nastavku će biti opisane neke od njih.

5.1. Metoda prioriteta prema vremenskom redoslijedu prijave (First come – first served – FCFS)

Politika FCFS metode je da se ide od prvog do zadnjeg po redoslijedu.

FIFO (First-In First-Out) je drugi naziv za FCFS. To je osnovna metoda upravljanja redovima. Funkcionira na principu da prvi paket koji stigne u red, čeka na posluživanje i nastavlja put prema odredištu što je prikazano slikom 4. Kod FIFO metode ne postoji kategorizacija i različiti tretman paketa i tokova, a koristi se tamo gdje se koristi metoda pružanja najbolje usluge u određenom trenutku. Ukoliko se paketi, zbog zagušenja, ne mogu izravno proslijediti na izlazno sučelje spremaju se u međuspremnik kako bi se nakon oslobađanja mrežnih resursa paketi uzimali iz međuspremnika istim redoslijedom kako su u njega i ušli. Ukoliko je zagušenje toliko da memorija međuspremnika nije dovoljna za pohranu svih paketa dolazi do odbacivanja, [8].



Slika 4. Prikaz metode posluživanja FIFO

Izvor: [25]

Temelj metode prioriteta prema vremenskom redoslijedu prijave je sustav tvrdnji. Ako dvije osobe počnu razgovarati u isto vrijeme, oni prepoznaju tu činjenicu i oboje prestaju, prije ponavljanja njihove poruke malo kasnije, [26]. Kod metode prve prijave (*first come – first served*) prednost u dobivanju kapaciteta ima sudionik koji prvi podnese zahtjev za dodjelu kapaciteta. Operator sustava obavlja dodjelu sve dok ima raspoloživog kapaciteta, a kada ostane bez raspoloživog prijenosnog kapaciteta – *Available Transmission Capacity* (ATC) on je prekida, [27].

Ova metoda ne razlikuje različite tokove. Uzima se u obzir uređivanje rasporeda kako bi se razlikovali različiti tokovi. Općenito, raspored paketa bi trebao imati sljedeće osobine:

- malo vremena kompleksnosti za odabir i prosljeđivanje paketa;
- razmjerno tretiranje različitih protoka;
- osiguravanje niskih najgorih mogućih kašnjenja i varijacija kašnjenja;
- trebao bi biti dovoljno jednostavan da se učinkovito provodi, [28].

Po ovoj metodi uslužuje se, zadatak s najstarijim zahtjevom iz grupe spremnih zadataka. Alokacija procesa se obavlja po redoslijedu dolaska zadataka.

Metoda FCFS započinje najjednostavnijim algoritmom. Odabere se prvi zadatak iz reda pripravnih procesa te se njemu dodijeli procesor. Novi proces smješta se na kraj reda (*tail*), a procesor uzima proces na izvršavanje s glave reda (*head*). Primjer je prikazan u nastavku, [29].

Proces	Potrebno vrijeme obrade
P ₁	24
P ₂	3
P ₃	3

- P₁, P₂, P₃

P ₁	P ₂	P ₃
0	24	27
		30

Prosječno vrijeme čekanja iznosi $(0 + 24 + 27)/3 = 17$ jedinica vremena

- P₂, P₃, P₁

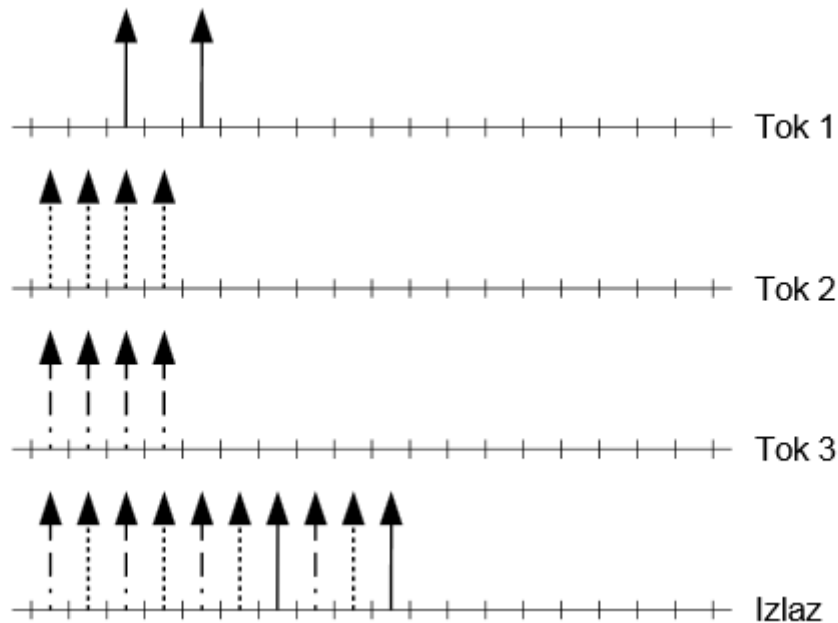
P ₂	P ₃	P ₁
0	3	6
		30

Prosječno vrijeme čekanja iznosi $(0 + 3 + 6)/3 = 3$ jedinica vremena.

Vremena dolaska (međudolazna vremena/*headway*) i posluživanja mogu biti:

- konstantna (uvijek jednako vrijeme između dolazaka i posluživanja),
- varijabilna, ali unaprijed poznata (određena) i
- slučajna, kad vrijeme trajanja usluge nije poznato, ali je moguće odrediti njegovu razdiobu vjerojatnosti.

Postoje i određeni problemi koji se mogu javiti primjenom ove metode što je prikazano slikom 5.



Slika 5. Problemi primjene FCFS metode

Izvor: [30]

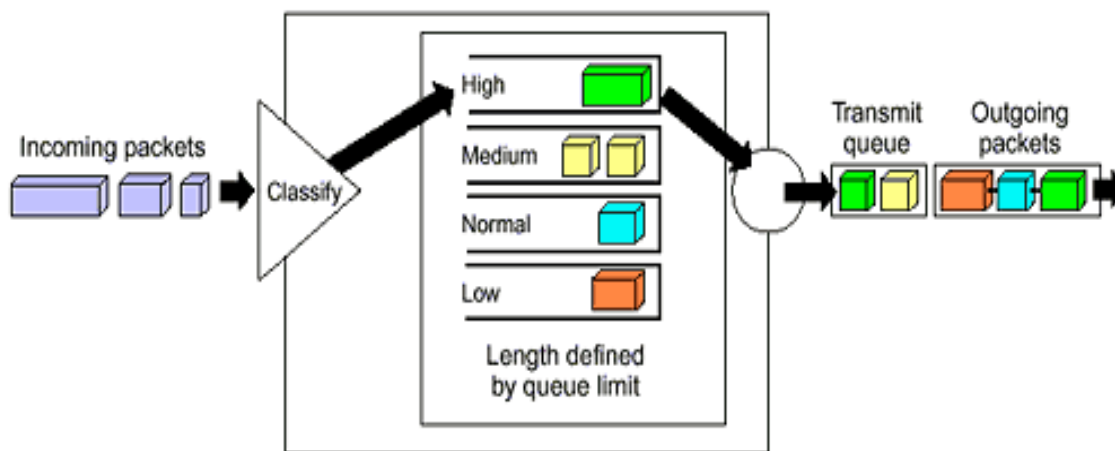
Slikom su prikazana tri toka. Za prvi tok je specificirano vrijeme između nailaska dva uzastopna paketa dvije vremenske jedinice dok je za drugi i treći tok to 5 jedinica. Vidljivo je da drugi i treći tok ne poštuju svoje specifikacije te šalje podatke puno bržim ritmom od zahtijevanog. Dolazak svakog paketa prikazan je strelicom. Za sve te pakete se pretpostavlja kako su iste veličine, te da njihov prijenos traje točno jednu jedinicu. Zadnja linija na slici prikazuje izlazni mrežni promet iz poslužitelja. Iako tok jedan poštuje specifikaciju zbog drugih tokova ne dobiva traženu uslugu. Kako bi se takva situacija izbjegla, ali i druge mnogobrojne nepravilnosti, koristi se algoritam koji na osnovu specifikacije toka, njegova ponašanja u prošlosti i zauzeća poslužitelja, odlučuje o redoslijedu posluživanja, [19].

5.2. Priority Queuing (PQ)

„*Priority Queuing*“ (PQ) je metoda koja omogućuje kategorizaciju paketa prema mrežnom protokolu (IP, IPQ, *Apple talk*), dolaznom sučelju, veličini paketa, izvorišnoj i odredišnoj IP adresi, itd. PQ omogućuje prioritetnom prometu najvišu razinu usluge na bilo kojoj točki na kojoj je primijenjen odnosno pruža najviši prioritet i trenutnu obradu „kritičnom“ prometu. Kod ove metode, dolazni paketi raspoređuju se u redove čekanja s različitim prioritetima, prioriteti se definiraju za svaki čvor mreže posebno. Prvo se prosljeđuju paketi sa najvišim prioritetom, a nakon što se proslijedi zadnji paket iz aktivne prioritetne skupine, prelazi se na pakete nižeg prioriteta s tim da se nakon svakog proslijeđenog paketa obavlja provjera ima li paketa u redovima s višim prioritetom čime se daje apsolutni prioritet paketima koji su više klasificirani. *Priority Queuing* metoda korisna je za omogućavanje visoke kvalitete usluge i prijenos vremenski osjetljivih informacija, ali istovremeno značajno smanjuje kvalitetu usluge niže klasificiranom prometu, [31].

Kada nastupi zagušenje odbacuju se paketi iz reda čekanja s paketima s manjim prioritetom. Problem se pojavljuje ako je previše paketa s višim prioritetom jer u tom slučaju paketi s manjim prioritetom uopće ne bivaju posluženi.

Kako bi se ipak spriječilo da više klasificirani promet zaguši promet niže klasifikacije, PQ se koristi u kombinaciji s mehanizmima za ograničavanje kapaciteta kojima se prometu višeg prioriteta osigurava određeni postotak prijenosnog pojasa nakon čega se prazne redovi prometa nižeg prioriteta, [32].



Slika 6. Kategorizacija paketa *Priority queuing* metodom

Izvor: [33]

PQ metoda se razlikuje od "normalnog" reda, što prikazuje slika 6., jer se paketima određene sesije dodjeljuje kapacitet po njihovu prioritetu, [34].

PQ ima redove, svaki s različitim prioritetima. Paketi određenog reda se poslužuju samo ukoliko red višeg prioriteta ne sadrži pakete. Uz PQ, postoje četiri reda čekanja prioriteta: visoki, srednji, normalni i niski, [35].

Veličina reda ne mora nužno utjecati na količinu proslijeđenog vremena kojeg će paket u tom redu primiti. Ograničenje veličine reda za PQ konfiguriran je u paketima. Red visokog prioriteta uvijek se služi prvi; a zatim ako je red visokog prioriteta čekanja prazan, prazni se srednji red. Nakon reda srednjeg prioriteta prazni se normalni red. Konačno, ako su visoki, srednji i normalni redovi prazni, red niskog prioriteta se prazni.

5.3. Kružno posluživanje (Round Robin – RR)

„*Round Robin*“ metoda je koncept odabira svih elemenata u skupini jednako, po nekom racionalnom rasporedu, obično od vrha prema dnu popisa, a onda opet s vrha popisa i tako dalje. Jednostavan način za opisati RR metodu je da se radi o metodi koja se odvija naizmjenice. Kod rada računala, jedan od načina posjeda različitih programskih procesa je korištenjem resursa računala ograničiti svaki proces na određeno kratko vremensko razdoblje, a zatim obustaviti taj postupak određeno vrijeme. To se često opisuje kao raspoređivanje „*Round Robin*“ procesa, [36].

RR metoda funkcionira na principu „kružnog“ posluživanja prometa. Ona uspostavlja zaseban red čekanja za svaki tok podataka koje zatim naizmjenično poslužuje aktivne redove čekanja. U slučaju da u određenom redu čekanja nema paketa taj red se preskače i prelazi na slijedeći red. Negativna strana ove metode je nemogućnost postavljanja prioriteta za pojedine redove čekanja nego svi redovi imaju isti prioritet.

Prema [37] razlikuju se slijedeći načini ove metode:

1. *Weighted Round Robin (WRR)* – ova metoda razvijena je kako bi se otklonio nedostatak metode RR u nemogućnosti postavljanja prioriteta za redove čekanja. WRR ima mogućnost dodjeljivanja bilo kojem redu čekanja određeni prioritet prema kojemu će ti redovi biti posluženi.
2. *Deficit Weighted Round Robin (DWRR)* – alternativa WRR metodi radi na principu da iz svakog reda čekanja pušta definirani broj okteta, a ne paketa. Nakon što se posluži definirani broj okteta prelazi se u sljedeći red čekanja po RR metodi. Poslužuje se

fiksni broj bita (kvantum) od svakog reda nakon čega se vrijednost kvantuma smanjuje za vrijednost veličine prenesenih paketa.

	Pon	Uto	Sri	Čet	Pet	Sub	Ned	Pon	Uto	Sri	Čet	Pet	Sub	Ned
Set 1	✓							✓						
Set 2		✓							✓					
Set 3			✓							✓				
Set 4				✓							✓			
Set 5					✓							✓		
Set 6						✓							✓	
Set 7							✓							✓

Slika 7. Primjer *Round Robin* metode

Izvor: [38]

Kod RR metode (slika 7.) paketi primaju uslugu na temelju reda kojem pripadaju, i u svakom ciklusu, broj paketa poslužen po redu je proporcionalan pridruženoj težini i prosječnoj veličini paketa, [39].

RR čekanje se naziva i uobičajeno čekanje. Stvoreno je u pokušaju da se dostigne pravedna distribucija resursa među tokovima tijekom korištenja najmanje procesorske snage. Svi redovi kod RR metode se poslužuju na sekvencijski kružni način.

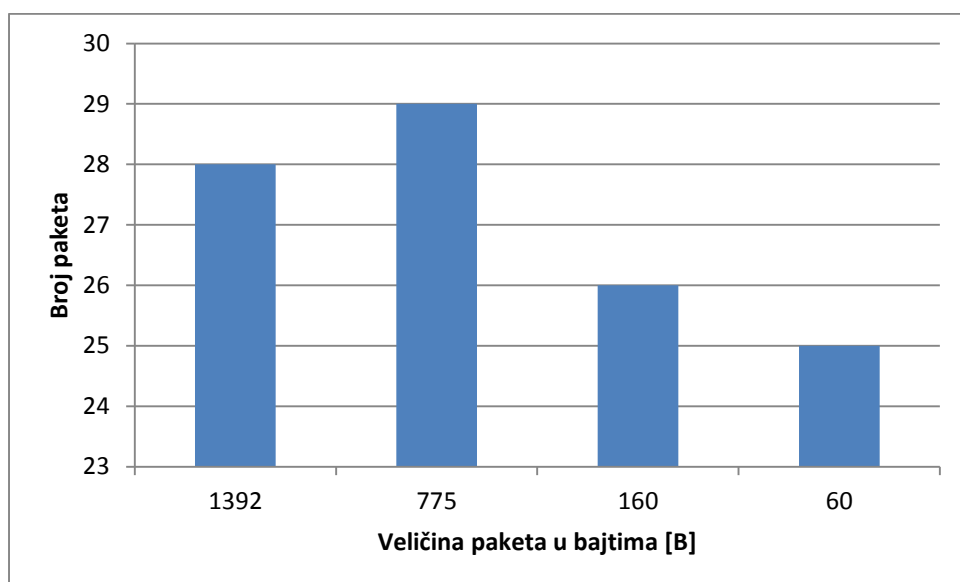
Algoritam RR uzima u obzir jedino faktor kašnjenja. Red paketa s većim vremenom čekanja u "redu" dobit će viši prioritet od reda s manjim vremenom čekanja. Rezultat je algoritam koji daje jednaku mogućnost prioritetnim redovima s podacima u međuspremniku da budu izabrani. Sam algoritam je vrlo jednostavan, ali loših performansi, [40].

RR metoda je naročito efikasna kod sustava s dijeljenim vremenom opće namjene, kao što su sustavi za procesiranje transakcija.

6. ANALIZA VREMENA ČEKANJA

U ovome radu napravljena je analiza vremena čekanja paketa za četiri klase s različitim brojem i veličinom paketa. Također, ta vremena su analizirana kroz tri različite metode dodjele kapaciteta *First Come First Served* (FCFS), *Priority Queuing* (PQ), te *Round Robin* (RR).

Slučajnim redoslijedom generirano je 108 paketa s različitim vremenima dolaska u rasponu od 0 do 200 ms. Svakom paketu dodijeljena je jedna od četiri klase, a klase su definirane temeljem duljine paketa koja je također generirana u okviru simulacije. Veličina paketa određena je analizom prijenosa različitih video i zvučnih sadržaja (HD-*High Definition*, SD-*Standard Definition* i zvuk) u programskom alatu *Wireshark*. To je alat za analizu mrežnih paketa pomoću kojeg su odabrane prosječne veličine paketa potrebne za različite izračune u ovom radu.



Graf 1. Broj i veličina paketa

Ukupan broj paketa generiran simulacijom je 108, te su slučajnim redoslijedom raspoređeni u jednu od četiri klase. Klasa 1 se sastoji od 28 paketa veličine 1392 bajta, klasa 2 se sastoji od 29 paketa veličine 775 bajta, klasa 3 se sastoji od 26 paketa veličine 160 bajta, dok se klasa 4 sastoji od 25 paketa veličine 60 bajta (graf 1).

Također, postavljene su i tri različite veličine kapaciteta (C). Kapacitet 1 (C_1) iznosi 10 Mb/s, kapacitet 2 (C_2) je 5 Mb/s, dok je kapacitet 3 (C_3) 3Mb/s. Vrijeme trajanja simulacije

iznosilo je, kako je ranije navedeno, 200 ms iz čega proizlazi da intenzitet nailazaka paketa u čvor višeslužne mreže (λ) iznosi 108 pak/200 ms.

Analiza je provedena u alatu Microsoft Excel. Iz zadanih vrijednosti izračunata su vremena posluživanja svakog pristiglog paketa prema izrazu iz [41]

$$T_s = \frac{\bar{p}}{C} \cdot 1000 \quad (1)$$

gdje T_s označava vrijeme trajanja posluživanja, \bar{p} označava prosječnu duljinu paketa izraženu u bitima, C je oznaka za kapacitet, a množenje s 1000 označava pretvaranje vremena iz sekundi u milisekunde. Kako je vrijeme dolaska paketa u čvor bilo poznato, budući da je ono generirano tijekom simulacije (0-200 ms), vrijeme završetka posluživanja svakog pojedinog paketa računato je prema izrazu:

$$T_z = T_{dp} + T_s \quad (2)$$

gdje T_z označava vrijeme završetka posluživanja, dok je T_{dp} vrijeme dolaska paketa u čvor. Poznajući te tri vrijednosti (T_s , T_{dp} i T_z) za svaki paket, vrijeme čekanja izračunato je prema izrazu:

$$T_w = T_z - T_{dp} - T_s \quad (3)$$

gdje T_w označava vrijeme čekanja paketa. Dodatne analize napravljene su u vidu izračuna vremena kašnjenja paketa T_q (izraz 4) i prosječne duljine reda L_w (izraz 5).

$$T_q = T_w + T_s \quad (4)$$

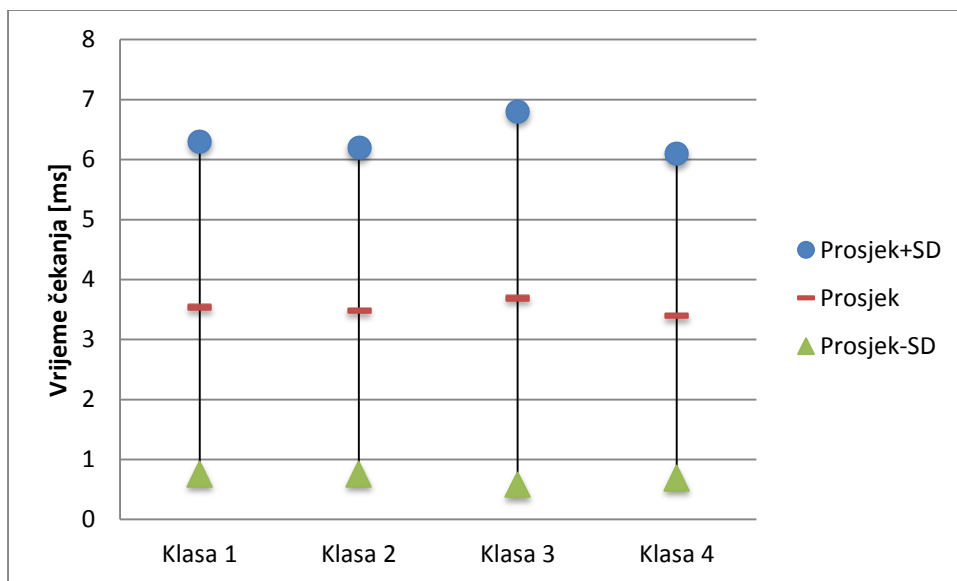
$$L_w = T_w \cdot \lambda \quad (5)$$

Izračunati su prosječna vremena čekanja i standardna devijacija za T_w . Također, izračunato je i prosječno prometno opterećenje ili iskorištenje kanala (sustava) koje se označava s ρ (prema [41] slijedi da je: $\rho = \frac{\lambda \cdot \bar{p}}{C}$), za sva tri kapaciteta C . Kao što rezultati pokazuju, dobio se sustav sa malim, srednjim i velikim prometnim opterećenjem. Pri C_1 ρ iznosi 0,268444, pri C_2 ρ je 0,536888, a pri C_3 ρ je 0,894813.

Navedene veličine (izrazi od 1 do 4) izračunate su za sve pakete svih četiriju klasa prometa i za sva tri definirana kapaciteta, te za tri metode dodjele kapaciteta. Zbog relativno

malih vrijednosti vremena čekanja izračunatih za C_1 i C_2 , bez obzira na korištenu metodu dodjele kapaciteta, odlučeno je da će se daljnja analiza napraviti samo za kapacitet C_3 . C_1 i C_2 su relativno veliki za definirane veličine paketa stoga je njihov T_s relativno malen što uzrokuje mala vremena čekanja.

U sljedećim grafovima prikazani su rezultati analize standardne devijacije (SD) i prosjeka za T_w za sve tri metode dodjele kapaciteta (FCFS, PQ, RR). Napravljena je usporedba sve četiri klase za svaku metodu posebno. Iz dobivenih rezultata je vidljivo kako se T_w ponaša kod određene metode dodjele kapaciteta, te koliko je odstupanje od prosjeka za pojedinu klasu.

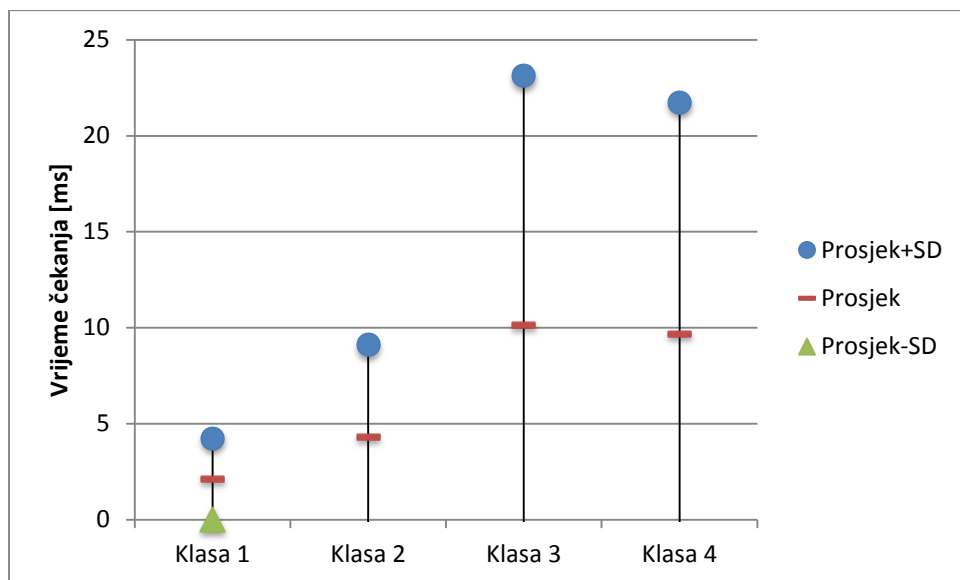


Graf 2. FCFS: Prosjek T_w za klase 1-4

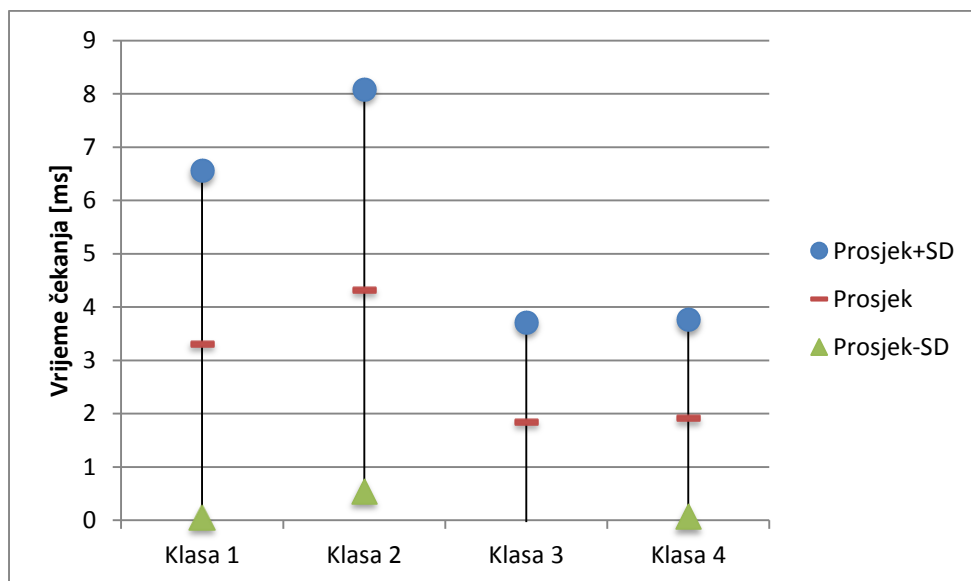
Kod FCFS-a je vidljivo iz grafa 2 da postoji vrlo malo odstupanje T_w između klasa jer niti jedna klasa nema prioritet pa svi slično čekaju. To se događa jer se paketi poslužuju po redoslijedu dolaska, tj. prvi koji stigne bude prvi i poslužen. Također, jako bitno je i vrijeme čekanja koje je kod svih klasa slično. Kod ove metode zabilježeno je relativno veliko standardno odstupanje zbog činjenice da je generiran relativno mali broj paketa (108) što je uzrokovalo veće varijacije u vremenima čekanja kod pojedine klase paketa.

Na grafu 3 prikazane su prosječne vrijednosti vremena čekanja i SD za strategiju dodjele kapaciteta PQ. Ovdje je jasno vidljiv utjecaj uvođenja posluživanja s prioritetom u čvoru višeuslužne mreže. Klasa 1 ima najmanje prosječno vrijeme čekanja, dok se ono kod klase 2 povećava. Kod klase 3 i 4 T_w je relativno velik zbog niskog prioriteta. Iz grafa 3 se vidi da PQ ima malo standardno odstupanje od prosjeka kod prve dvije klase, dok je kod treće

i četvrte ono veće. To je zbog toga što prva i druga klasa imaju najveći prioritet, stoga njihova vremena čekanja manje osciliraju za vrijeme trajanja simulacije, dok kod treće i četvrte klase paketi ponekad duže čekaju. Također, na ovakve rezultate utječe i veličina T_s , koja je veća kod klase 1 i 2 u odnosu na klase 3 i 4.



Graf 3. PQ: Prosjek T_w za klase 1-4



Graf 4. RR: Prosjek T_w za klase 1-4

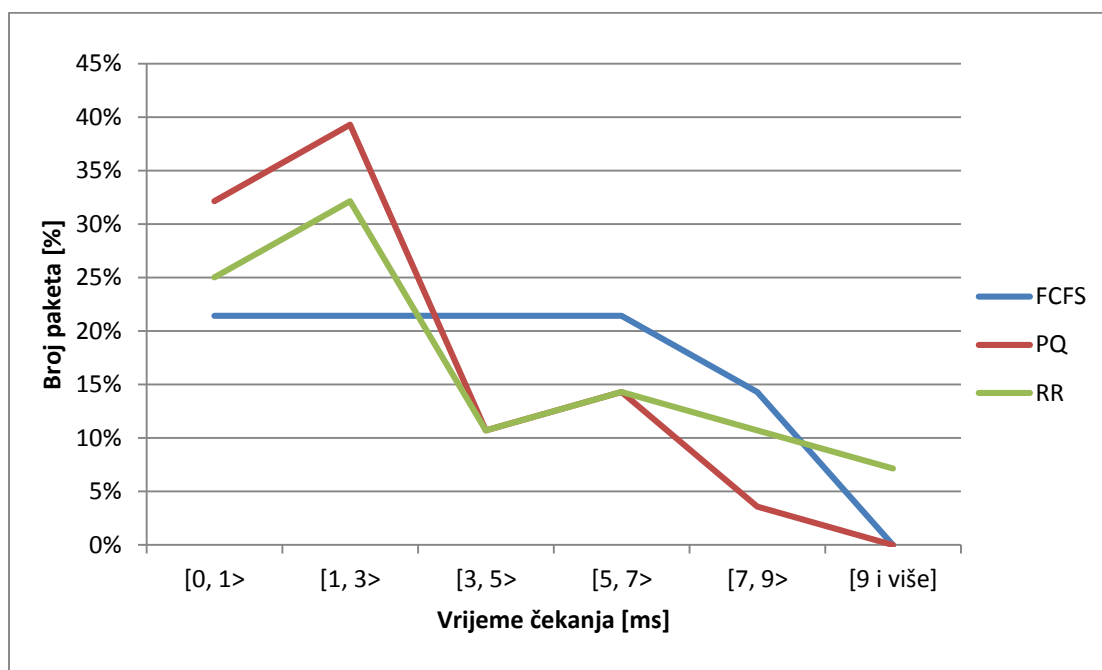
Rezultati iste analize za metodu *Round Robin* prikazani su grafom 4. Ovdje je prisutno veće odstupanje od prosjeka za prvu i drugu klasu, dok je malo odstupanje kod treće i četvrte klase. RR ne daje ni jednoj klasi prioritet, nego ih ciklički poslužuje. Kod treće i četvrte klase

su paketi kraći pa ih se može više poslužiti unutar jednog ciklusa¹, dok se kod prve i druge klase stvara veće čekanje. Veličina paketa za klasu 1 je bila najveća i iznosila je 11136 bita što je uzrokovalo da se u jednom ciklusu može poslužiti samo jedan paket prve klase. Kod klase 2 veličina paketa je također bila relativno velika (6200 bita) te je i njoj bio omogućeno posluživanje samo jednog paketa u jednom ciklusu. Klasa 3 je imala mnogo manje veličine paketa (1280 bita) što je omogućilo da u jednom ciklusu može poslužiti do 8 paketa te klase. Veličina paketa klase 4 je najmanja, 480 bita, te u jednom ciklusu može poslužiti i do 23 paketa klase 4.

¹ Veličina jednog ciklusa određena je proizvoljno i izražena je u bitima. U ovome primjeru unutar jednog ciklusa moglo se poslužiti najviše 11500 bita podataka pojedine klase.

7. USPOREDBA PERFORMANSI RAZLIČITIH METODA DODJELE KAPACITETA

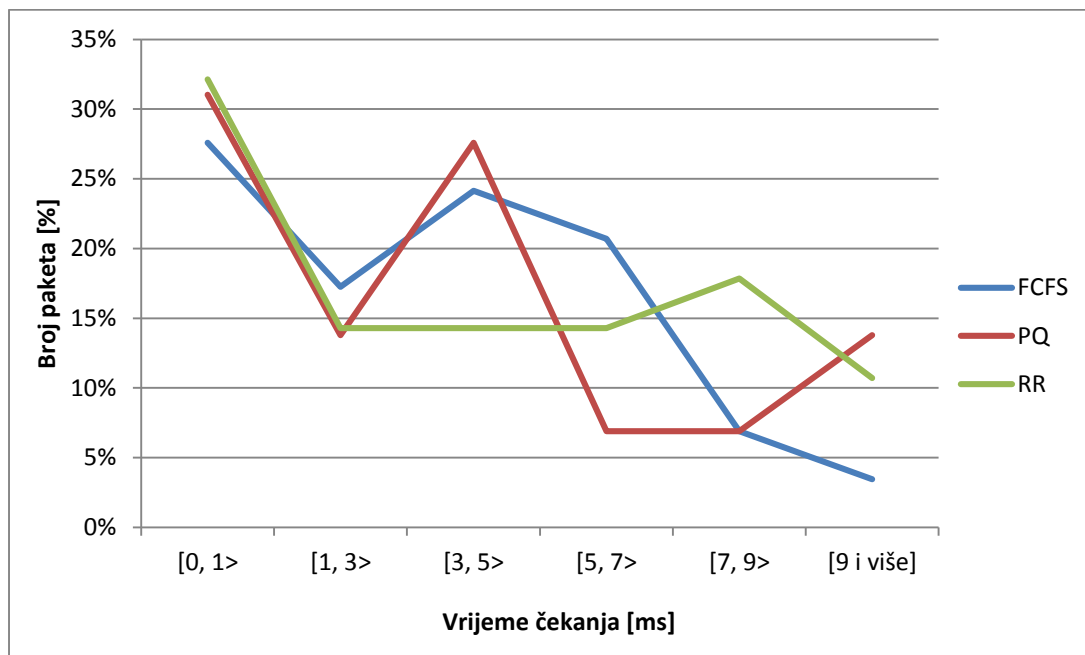
Na sljedećim grafikonima prikazane su razdiobe vremena čekanja (T_w) za pojedine metode dodjele kapaciteta. Prikazani rezultati otkrivaju kolika su čekanja za pojedinu klasu izračunata na temelju C_3 , te je napravljen usporedni prikaz tih rezultata za sve tri korištene metode (FCFS, PQ, RR). Vrijednosti su svrstane u određene razrede ($[0-1>$, $[1-3>$, $[3-5>$, $[5-7>$, $[7-9>$, $[9$ i više] ms) da bi se dobila određena razdioba. Vremena su izračunata u milisekundama te je prikazan postotak paketa koji imaju čekanje iz određenog razreda.



Graf 5. Razdioba vremena čekanja za klasu 1 i C_3

Kod klase 1 vidi se da paketi imaju manja vremena čekanja kada se koristi PQ strategija dodjele kapaciteta u odnosu na FCFS. To je najviše izraženo upravo kod ove klase 1 koja ima najveći prioritet, te većina paketa ne čeka ili ima vrlo malo vrijeme čekanja u intervalu $[1-3>$ ms. FCFS ima slična vremena čekanja u svim intervalima jer sve klase imaju jednak tretman (što je u skladu s prijašnje prikazanim rezultatima). Većina paketa ne čeka ili mora vrlo malo čekati. C_3 je bio dovoljno velik da opsluži te pakete tako da ih je bilo relativno malo (14%) u intervalu $[7-9>$ ms, dok ih u intervalu $[9$ i više] ms uopće nije bilo. Upotrebom metode *Round Robin* dobio se mali broj paketa (7%) koji imaju vrijeme čekanja u intervalu $[9$ i više] ms što je vidljivo iz grafa 5. Razlog tomu je nemogućnost posluživanja više od jednog paketa u jednom vremenskom ciklusu što je uzrokovalo stvaranje reda zbog čega su neki

paketi morali duže čekati. Ipak, najveći broj takvih paketa (32%) se nalazi u intervalu [1, 3> ms.

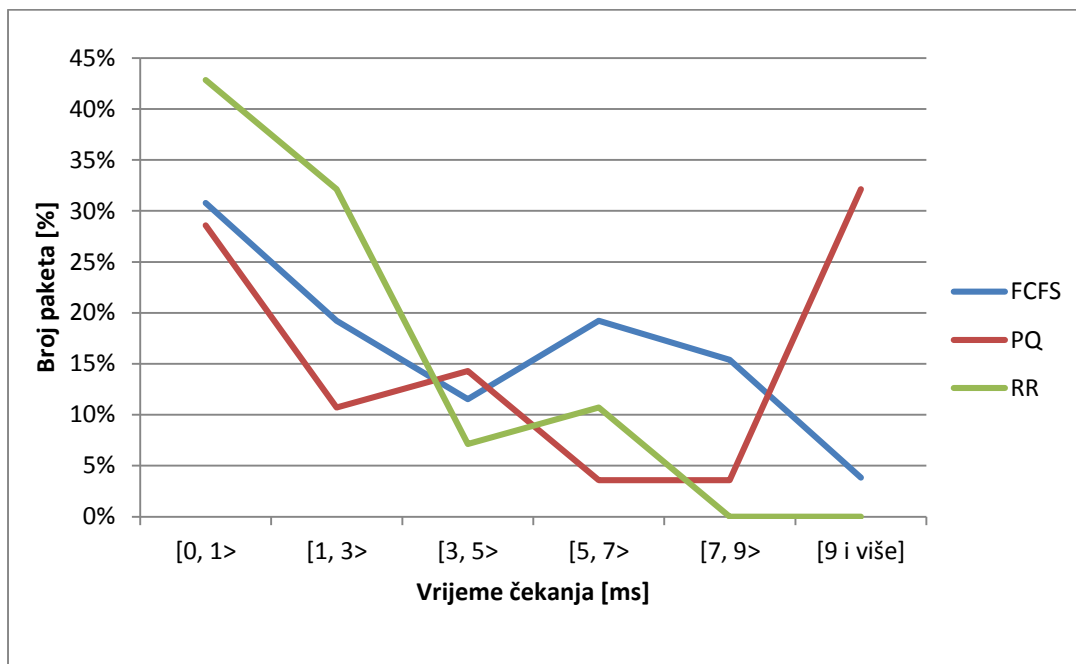


Graf 6. Razdioba vremena čekanja za klasu 2 i C_3

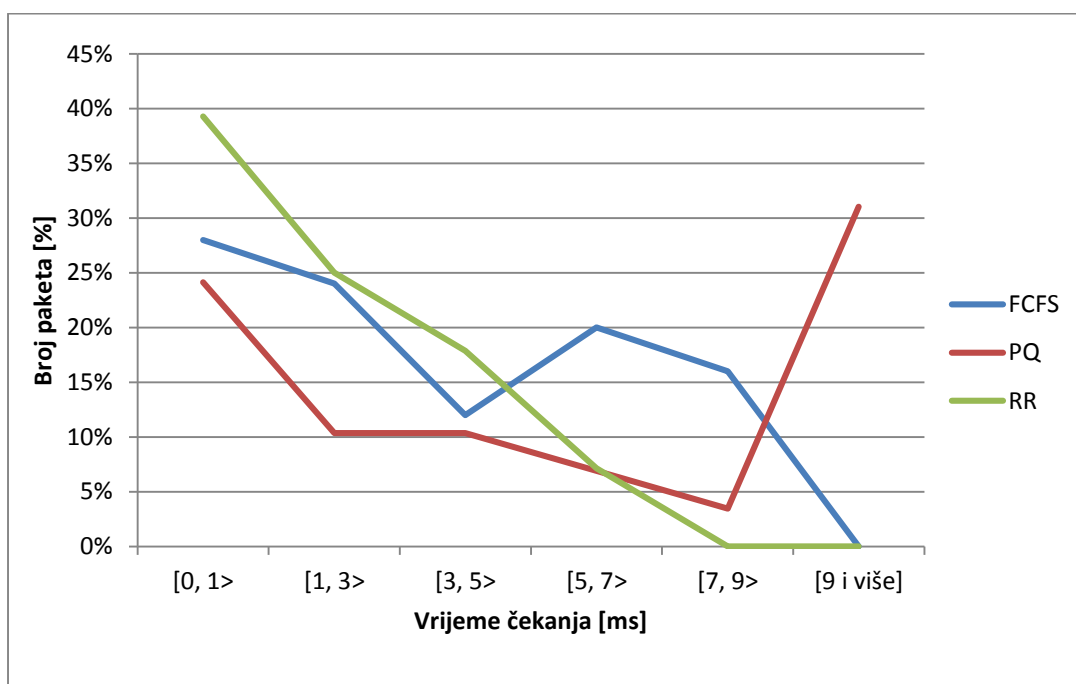
Iz grafa 6 se vidi da sve tri metode imaju najviše paketa koji ne čekaju ili vrlo malo čekaju, tj. vremena čekanja kod približno 30% paketa nalazi se u intervalu [0-1> ms. Za klasu 2 kod PQ-a paketi imaju veća čekanja u odnosu na klasu 1 (graf 6), odnosno veliki broj paketa (28%) ima čekanje u intervalu [3-5> ms, te počinje rasti i razred s paketima koji imaju vrijeme čekanja u intervalu [9 i više] ms. To se događa zbog malo nižeg prioriteta od klase 1, ali takvi paketi se još relativno brzo poslužuju. FCFS ima najviše paketa sa srednjim čekanjem (45%), tj. u intervalima [3-5> i [5-7> ms, dok kod RR-a paketi imaju slična čekanja u svim vremenskim intervalima (osim većeg udjela paketa koji ne čekaju). Također, i za klasu 2 RR dopušta posluživanje samo jednog paketa u jednom ciklusu što stvara veliki broj paketa u svim vremenskim intervalima.

Razdioba vremena čekanja za klasu 3 (graf 7) otkriva da FCFS ima podjednaka čekanja s malim povećanjem u odnosu na klasu 2. Kod PQ strategije paketi klase 3 najčešće čekaju u intervalu [9 i više] ms (32%). To je uzrokovano malim prioritetom klase 3. Kod RR-a veliki postotak paketa (75%) ima vrijeme čekanja u intervalima [0-1> i [1-3> ms zbog toga što su paketi manje duljine, pa se brže poslužuju. Većih čekanja nema pa tako ova metoda omogućuje klasi 3 da nema paketa koji imaju vrijeme čekanja u intervalima [7-9> i [9 i više]

ms. RR ovoj klasi omogućuje posluživanje do 8 paketa u jednom ciklusu što je znatno više u odnosu na prethodne dvije klase.



Graf 7. Razdioba vremena čekanja za klasu 3 i C_3

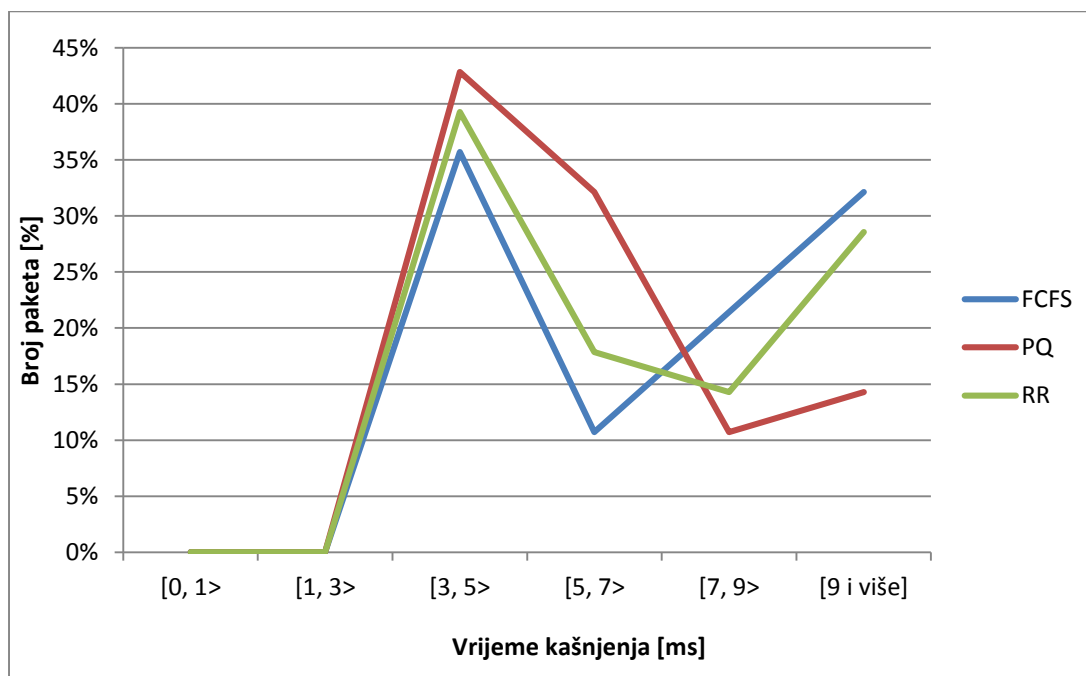


Graf 8. Razdioba vremena čekanja za klasu 4 i C_3

Rezultati pokazuju da je razdioba vremena čekanja za klasu 4 slična klasi 3 što se i vidi iz priloženih grafova (graf 8 i graf 9). Dobiveni rezultati pokazuju da FCFS metoda ima pakete sa sličnim vremenima čekanja zbog jednakog tretmana kod svih klasa. Kod PQ je sve

izraženije veliko čekanje u intervalu [9 i više] ms, dok se kod RR-a smanjuje vrijeme čekanja zbog kraćih paketa koji imaju mogućnost bržeg posluživanja. Također, ni kod ove klase nema paketa s vremenima čekanja u intervalima [7-9> i [9 i više] ms. RR omogućuje ovoj klasi posluživanje do 23 paketa u jednom ciklusu zbog čega se vrijeme čekanja smanjilo u odnosu na klase 1 i 2.

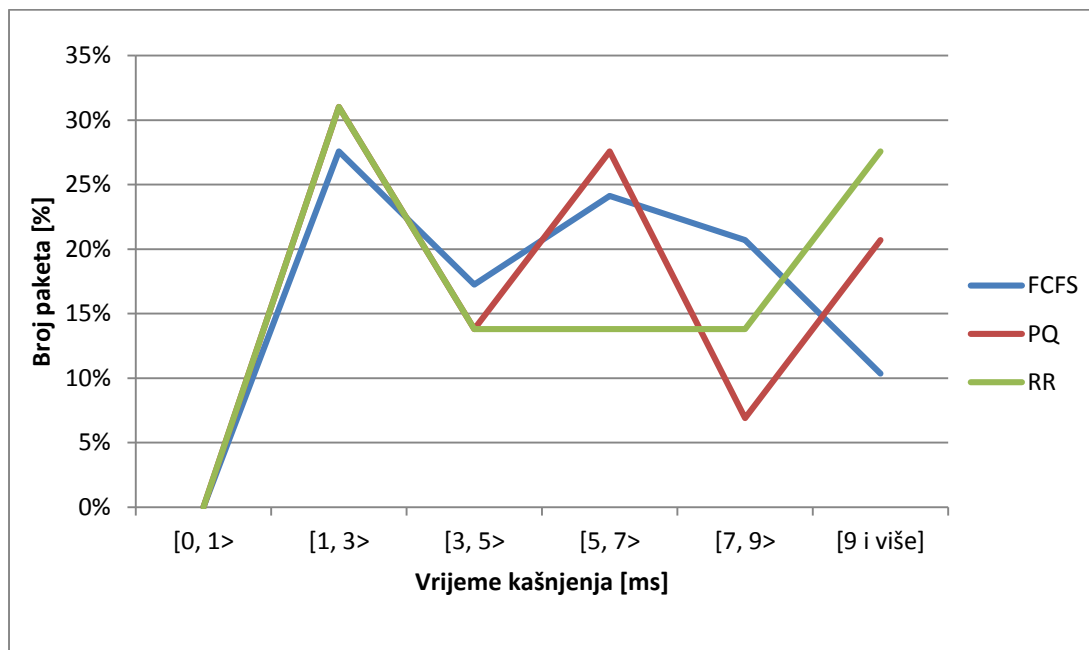
Sljedeći grafikoni prikazuju rezultate za T_q dobivene koristeći izraz (4). Oni pokazuju kolika su kašnjenja za pojedinu klasu izračunata za C_3 . Također, vrijednosti su svrstane u određene razrede ([0-1>, [1-3> [3-5>, [5-7>, [7-9>, [9 i više] ms) da bi se dobila određena razdioba. Vremena su izračunata u milisekundama te je prikazan postotak paketa koji imaju kašnjenje iz određenog razreda.



Graf 9. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 1 i C_3

Kod klase 1 nisu zabilježena vremena kašnjenja manja od 3 ms zbog toga što je T_s za klasu 1 veći od 3 ms što je vidljivo iz grafa 9. PQ ima najveći postotak paketa (43%) koji imaju vrijeme kašnjenja u intervalu [3-5> ms. To se događa zbog najvećeg prioriteta spomenute klase 1, te većina paketa ove klase ima vrlo mala kašnjenja. FCFS i RR imaju najveći broj paketa s vremenom kašnjenja između [3-5> ms, te s kašnjenjem većim od 9 ms. Za RR je to vezano za broj paketa koji se mogu poslužiti, u ovom slučaju samo jedan po ciklusu što je i izazvalo veće kašnjenje. Općenito se može primijetiti da su se udjeli broja

paketa u nižim razredima kašnjenja ($[0-1>$ i $[1-3>$ ms) smanjili u korist ostalih razreda kašnjenja što je i očekivano, budući da se vrijeme kašnjenja računalo prema izrazu 4.

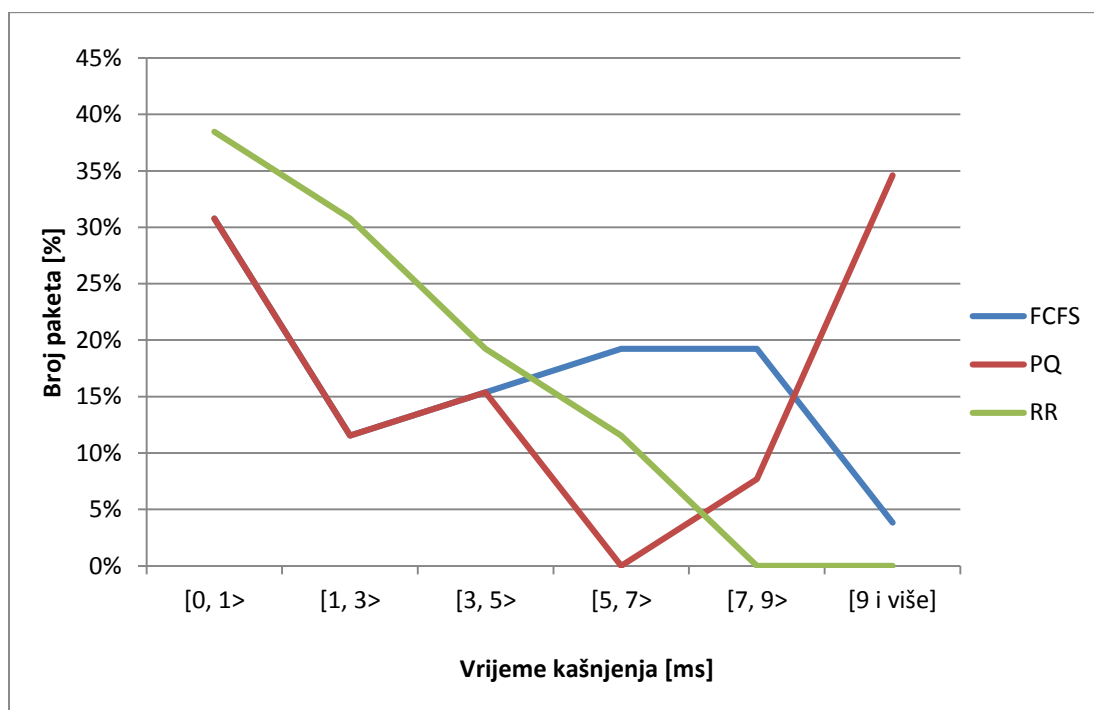


Graf 10. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 2 i C_3

Graf 10 pokazuje da paketi klase 2 nemaju kašnjenja ispod 1 ms zbog T_s . FCFS ima pakete s otprilike sličnim vremenima kašnjenja jer ova metoda ne razlikuje pakete po prioritetu nego po redoslijedu dolaska. Kod PQ-a takvi paketi i dalje su smješteni u intervalu između $[1-3>$ ms (31%). Ipak, postepeno nastaju paketi (21%) i u intervalu s većim vremenom kašnjenja $[5-7>$ ms zbog nižeg prioriteta u odnosu na klasu 1 gdje ih je bilo 14%. Iz grafa 10 se vidi da većina paketa kod RR-a ima vrijeme kašnjenja u intervalima $[1-3>$ i $[9 \text{ i više}]$ ms. Točnije, u svakom vremenskom intervalu se nalazi veliki broj paketa ove klase. To se događa zbog toga što u svakom ciklusu ova metoda može poslužiti najviše jedan paket uzrokujući time velike vrijednosti vremena kašnjenja kod većine paketa ove klase.

S grafa 11 vidljivo je da kod RR strategije dodjele kapaciteta većina paketa klase 3 (približno 70%) ima vrijeme kašnjenja do 3 ms (kod 38% paketa zabilježeno je vrijeme kašnjenja iz intervala $[0-1>$ ms, uz još 30% paketa s vremenima kašnjenja iz intervala $[1-3>$ ms). Kao što je ranije navedeno, razlog tomu je što se unutar jednog ciklusa može poslužiti do 8 paketa klase 3, što za posljedicu ima male vrijednosti vremena kašnjenja kod većine generiranih paketa ove klase. FCFS strategija ponovno uzrokuje relativno ravnomjerno vrijeme kašnjenja za sve pakete ove klase, što je u skladu s prethodnim rezultatima koji su ukazali na to da kod ove strategije sve klase prometa imaju približno ista prosječna vremena

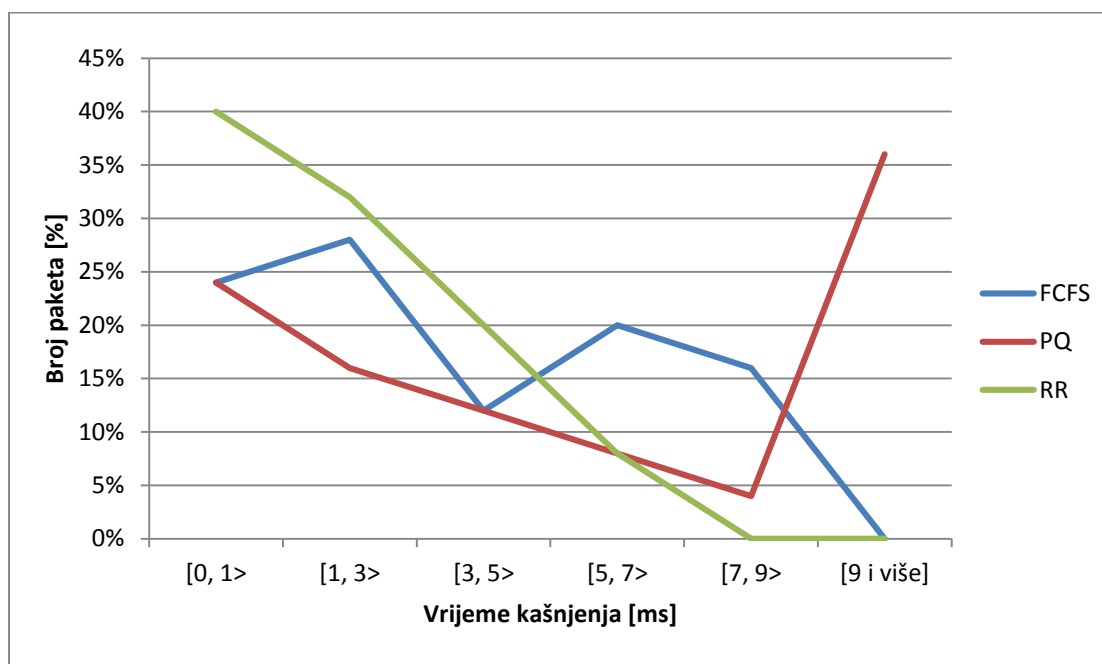
čekanja, budući da sve klase dobivaju jednaki tretman u mrežnom čvoru. Izuzetak predstavlja jedino relativno malen udio paketa s kašnjenjem od [9 ili više] ms što se može objasniti činjenicom da je vrijeme posluživanja ovih paketa znatno manje nego kod klase 1 i 2. Naposljetku, PQ strategija uzrokuje gotovo simetričnu razdiobu prosječnog vremena kašnjenja, gdje je kod značajnog broja paketa T_q manji od 3 ms (lijevi segment crvene krivulje na grafu 12), odnosno 35% paketa ima T_q iz intervala [9 i više] ms (desni segment iste krivulje). Ovo se može objasniti činjenicom da kada su redovi klasa paketa višeg prioriteta (1. i 2.) prazni, zbog relativno malog prosječnog vremena posluživanja klase 3 i nepostojanja čekanja, vrijednost kašnjenja jednaka je vremenu posluživanja. S druge strane pojavom paketa višeg prioriteta, čija su prosječna vremena posluživanja znatno veća, uzrokuje relativno veće kašnjenje paketa klase 3 što se i vidi na grafu 12.



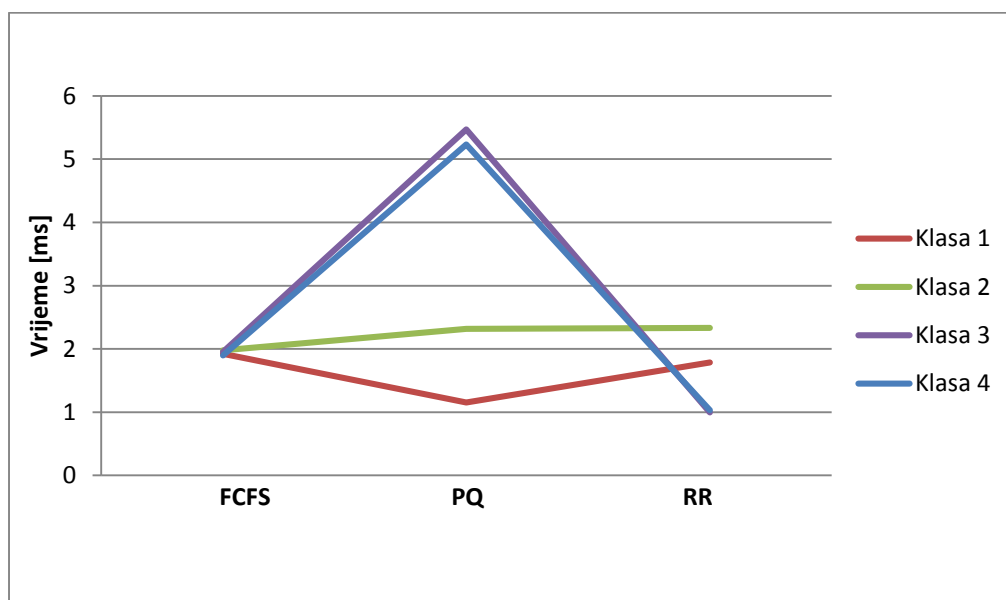
Graf 11. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 3 i C_3

Graf 12. prikazuje da se kod klase 4 također kašnjenje javlja između [0-1> ms zbog T_s . RR je izražen sa smanjenjem vremena kašnjenja od početka prema kraju, odnosno 72% paketa ima vrijeme kašnjenja u intervalima [0-1> i [1-3> ms jer se u ovoj klasi nalaze najkraći paketi koji se brže poslužuju. Ova metoda omogućuje klasi 4 da posluži maksimalno 24 paketa u jednom ciklusu (znatno više u odnosu na ostale klase), što utječe na male vrijednosti vremena kašnjenja kod paketa ove klase. PQ ima naglašeno vrlo veliko vrijeme kašnjenja paketa u intervalu [9 i više] ms (više od 35%) zbog najmanjeg prioriteta ove klase. FCFS ima

jako slična vremena kašnjenja kod svih T_q zbog jednakog tretmana kod svih klasa, izuzev intervala [9 i više] ms gdje se nalazi relativno malen udio paketa.



Graf 12. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 4 i C_3



Graf 13. Usporedba L_w za pojedine klase

Iz dobivenih rezultata za L_w prema grafu 13 vidi se da paketi kod FCFS-a imaju vrlo sličan L_w za sve klase. To je iz razloga što se FCFS paketi poslužuju po redoslijedu, tj. prvi došao prvi poslužen što znači da svi paketi imaju isti tretman u mrežnom čvoru. Kod klase 1

PQ ima najmanji L_w zbog najvećeg prioriteta te klase, dok je on najveći za PQ i klasu 3 i 4 zbog vrlo niskog prioriteta. RR ima manji L_w kod klase 3 i 4 u odnosu na klasu 1 i 2 zbog kraćih paketa koji se nalaze u tim klasama što ujedno omogućuje posluživanje većeg broja tih paketa. RR omogućuje posluživanje većeg broja paketa za klasu 3 i 4 u jednom ciklusu, a klasi 1 omogućuje posluživanje samo jednog paketa kao i klasi 2.

8. ZAKLJUČAK

Višeuslužne mreže su postale jako važne u životu svakog čovjeka jer omogućuju prijenos prometa više od jedne vrste aplikacije. Kao što se svakim danom pojavljuju nove usluge, tako sve više rastu i ljudski zahtjevi za boljom i kvalitetnijom uslugom. Za dobivanje kvalitetnije usluge ključnu ulogu imaju metode dodjele kapaciteta u mrežnim čvorovima.

Na temelju istraživanja tri različite metode dodjele kapaciteta *First Come First Served* (FCFS), *Priority Queuing* (PQ) i *Round Robin* (RR) postignuti su određeni rezultati. Analiza vremena čekanja provedena je na 108 generiranih paketa koji su svrstani u četiri različite klase s različitim brojem i veličinom tih paketa. Također, postavljena su i tri različita kapaciteta kako bi se dobio sustav malog, srednjeg i velikog opterećenja. U ovom radu prikazani su samo rezultati za C_3 koji je pokazao najveće prednosti i nedostatke svake od navedenih metoda dodjele kapaciteta (FCFS, PQ, RR). Analiza je provedena u Microsoft Excelu.

Dobiveni rezultati pokazuju da nijedna metoda nije savršena, odnosno svaka pokazuje određene nedostatke. FCFS metoda poslužuje prvi paket koji stigne u čvor, što omogućava da nijedan paket previše ne čeka. No, problem se stvara kada dođe prioritetniji paket i mora čekati da se posluži drugi paket koji je manje prioritetan samo zato jer je prvi stigao. PQ metoda pokazuje velike prednosti za pakete koji imaju veći prioritet tako što ih odmah poslužuje, u ovom slučaju to su klasa 1 i klasa 2. Međutim, u toj situaciji ispaštaju manje prioritetni paketi kod kojih se stvara veliko čekanje (klasa 3 i 4). Rezultati su pokazali da su te klase imale najviše paketa s vremenima čekanja i kašnjenja iznad 9 ms što je znatno više u odnosu na druge dvije metode. RR ne favorizira nikoga pa tamo gdje su paketi kraći više ih se može poslužiti. Prema viđenim rezultatima RR metoda se pokazala dobra za klasu 3 i klasu 4 gdje su paketi znatno kraći te je tamo čekanje manje u odnosu na klasu 1 i klasu 2 gdje su paketi veći. Kod klase 3 RR metoda omogućuje posluživanje do 8 paketa u jednom ciklusu, a kod klase 4 do 23 paketa u ciklusu što je znatno veće u odnosu na klasu 1 i klasu 2 koje imaju mogućnost posluživanja samo po jednog paketa u jednom ciklusu.

LITERATURA

1. <http://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/computing-and-ict/systems-computer/protocols-multi-service-networks/content-section-1.2>, (14. 5. 2015.)
2. Bošnjak, I.: Tehnologija telekomunikacijskog prometa II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001., str. 33
3. Popović, Ž.: Od telegrafskih do paketnih komutacijskih sustava, Ericsson Nikola Tesla REVIIJA 17 (2), 2004., str. 10-11
4. Baraković, J.: QoS signalizacija u višeuslužnim mrežama sljedeće generacije, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2007., str. 2
5. Dudak D.: Komunikacija korištenjem protokola SIP na pokretnim telefonima, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011., str. 32
6. Šaban J.: SIP protokol, Zavod za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2003., str. 13
7. Baraković, J.: QoS signalizacija u višeuslužnim mrežama sljedeće generacije, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2007., str. 4
8. Baraković, J.: QoS signalizacija u višeuslužnim mrežama sljedeće generacije, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2007., str. 5
9. Radovan, M.: Računalne mreže (1), 1. izdanje, Digital Point, Rijeka, 2010., str. 35
10. Radovan, M.: Računalne mreže (1), 1. izdanje, Digital Point, Rijeka, 2010., str. 37
11. Radovan, M.: Računalne mreže (1), 1. izdanje, Digital Point, Rijeka, 2010., str. 40
12. Bažant, A.: Osnove prijenosa podataka, Zavod za telekomunikacije, Zagreb, 2012., str. 19
13. Radovan, M.: Računalne mreže (1), 1. izdanje, Digital Point, Rijeka, 2010., str. 8
14. Mikac D., Mikac M.: Informacijske mreže, Laboratorijske vježbe, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2006./07., str. 45
15. Lacković M.: Modeliranje i analiza performansi optičkih transmisijskih mreža s komutacijom paketa, Magistarski rad, Fakultet elektronike i računarstva u Zagrebu, Zagreb, 2004., str. 28

16.

http://estudent.fpz.hr/Predmeti/T/Tehnologija_telekomunikacijskog_prometa/Materijali/5predavanje.pdf, (18. 5. 2015.)

17. Baraković, J.: QoS signalizacija u višeslužnim mrežama sljedeće generacije, BH Telecom, Sarajevo, 2006., str. 1

18.

http://estudent.fpz.hr/Predmeti/T/Tehnologija_telekomunikacijskog_prometa/Materijali/5predavanje.pdf, (4. 6. 2015.)

19. Petrović, K.: Ispitivanje sigurnosti mrežne opreme na uobičajene mrežne napade, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2009., str. 13

20. Bažant, A., Sinković, V., Kos, M., Mikac, B., Lovrek, I., Kunštić, M., Matijašević, M., Ilić, Ž., Gledec, G., Ježić, G.: Osnovne arhitekture mreža, Element, Zagreb, 2004., str. 37

21. http://koah.rs.ba/default.aspx?orn=orn7618968750&lang=sr-sp-latn&pg=telemedicina/qos/mrezn_i_qos_par.html, (9. 6. 2015.)

22. Bošnjak, I.: Telekomunikacijski promet II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2002., str. 39

23. Lovrek, I.: Modeli telekomunikacijskih procesa: teorija i primjena Petrijevih mreža, Školska knjiga, Zagreb, 1997. str. 5

24. Lam, N., Dziong, Z., Mason G.L.: Network Capacity Allocation in Service Overlay Networks, Managing Traffic Performance in Converged Networks Lecture Notes in Computer Science Volume 4516, 2007., str. 2

25. <http://hairstyletrends.xyz/fifo.html>, (8.9.2015.)

26. Wright, E., Reynders, D.: Practical Telecommunications and Wireless Communications: For Business and Industry, Elsevier, UK, 2004., Str. 160

27. Košarac, M.: Modul za dodjelu prijenosnih kapaciteta u NOS BIH-u, INFOTEH-JAHORINA, vol.6, Ref. D-5, 2007., Str. 198

28. Chuanxiong, G.:SRR: An O(1) Time Complexity Packet Scheduler for Flows in Multi-Service Packet Networks, Inst. of Comm. Eng., China, 2010., str. 3

29. Prema predavanjima kolegija „Operacijski sustavi“, Veleučilište u Rijeci, 2008/09.

30. Groš, S.: Mrežni sloj Interneta, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2006., str. 21
31. Cvitić, I.: Izbjegavanje zagušenja u Internetu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2007., str. 5
32. <http://www.opalsoft.net/qos/DS-23.htm>, (22. 6. 2015.)
33. <http://www.cesnet.cz/doc/techzpravy/2007/rtp-delay-model/>, (22. 6. 2015.)
34. <http://pages.cs.wisc.edu/~vernon/cs367/notes/11.PRIORITY-Q.html>, (25. 6. 2015.)
35.
https://www.informit.com/library/content.aspx?b=CCIE_Practical_Studies_II&seqNum=62,
(26. 6. 2015.)
36. <http://whatis.techtarget.com/definition/round-robin>, (26. 6. 2015.)
37. Zorić, S.: QoS signalizacija u IP višemedijskom podsustavu UMTS-a, Fakultet elektronike i računarstva, Zagreb, 2009., str. 5
38.
http://sistemac.srce.unizg.hr/index.php?id=35&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=823
(26. 6. 2015.)
39. Jiang, Y., Tham, C.: A Probabilistic Priority Scheduling Discipline for Multi-Service Networks, Centre for Wireless Communication, Singapore, 2002., str. 11
40. Medvid, I.: Prikaz funkcionalnosti brzoga paketnog pristupa silaznom vezom, Revija19/2006/1, Ericsson Nikola Tesla, str. 11
41. Mrvelj, Š., Bošnjak, I.: Primjeri i zadaci iz telekomunikacijskog prometa, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001.

POPIS KRATICA

FCFS - *First Come First Served*

PQ - *Priority Queuing*

RR - *Round Robin*

SIP - *Session Initiation Protocol*

RTCP - *Real-time Transport Control Protocol*

QoS - *Quality of Service*

POTS - *Plained Old Telephone Service*

MSN - *Multi Service Network*

OSI RM - *Open Systems Interconnection/Reference Model*

ATM - *Asynchronous Transfer Mode*

FR - *Frame Relay*

VPN - *Virtual Private Network*

MPLS - *Multiprotocol Label Switching*

LMDS - *Local Multipoint Distribution Service*

IP - *Internet Protocol*

IETF - *Internet Engineering Task Force*

3GPP - *The 3rd Generation Partnership Project*

SR - *Sender Report*

RR - *Receiver Report*

XR - *eXtended Report*

SLA - *Service Level Agreement*

LDP - *Label Distribution Protocol*

CR-LDP - *Constraint-based Routing Label Distribution Protocol*

RSVP-TE - *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*

DS TE - *DiffServ-Aware Traffic Engineering*

LSP - *Label Switched Path*

LRR - *Fast Rerouting*

TCP - *Transmission Control Protocol*

UDP - *User Datagram Protocol*

SMTP - *Simple Mail Transfer Protocol*

HTTP - *HyperText Transfer Protocol*

GoS - *Grade of Service*

NP - *Network Performance*

ISP - *Internet Service Provider*

FTP - *File Transfer Protocol*

DNS – *Domain Name System*

FIFO - *First-In First-Out*

ATC - *Available Transmission Capacity*

WRR - *Weighted Round Robin*

DWRR - *Deficit Weighted Round Robin*

POPIS SLIKA

Slika 1. Slojeviti prikaz slojeva na kojemu mrežni čvor obavlja funkcije	9
Slika 2. Čvorovi računalne mreže	11
Slika 3. Preslikavanje parametara kvalitete	19
Slika 4. Prikaz metode posluživanja FIFO	25
Slika 5. Problemi primjene FCFS metode	27
Slika 6. Kategorizacija paketa <i>Priority queuing</i> metodom	28
Slika 7. Primjer <i>Round Robin</i> metode	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlika između fiksnog i alternativnog usmjeravanja

15

POPIS GRAFIKONA

Graf 1. Broj i veličina paketa	31
Graf 2. FCFS: Prosjek T_w za klase 1-4	33
Graf 3. PQ: Prosjek T_w za klase 1-4	34
Graf 4. RR: Prosjek T_w za klase 1-4	34
Graf 5. Razdioba vremena čekanja za klasu 1 i C_3	36
Graf 6. Razdioba vremena čekanja za klasu 2 i C_3	37
Graf 7. Razdioba vremena čekanja za klasu 3 i C_3	38
Graf 8. Razdioba vremena čekanja za klasu 4 i C_3	38
Graf 9. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 1 i C_3	39
Graf 10. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 2 i C_3	40
Graf 11. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 3 i C_3	41
Graf 12. Razdioba vremena kašnjenja za klasu 4 i C_3	42
Graf 13. Usporedba L_w za pojedine klase	42